

光波コヒーレンス関数の合成技術による 光ファイバー神経網の高機能化

保 立 和 夫

Performance Improvement of Fiber-Optic Nerve Systems by Synthesis of Optical Coherence Function

Kazuo HOTATE

“Synthesis of Optical Coherence Function” is described both in principle and applications. By controlling optical frequency, intensity and phase of a light source in an interferometer, coherence characteristics of the source can arbitrarily be synthesized. This technique provides us with unique schemes for distributed and multiplexed sensing. “Fiber optic nerve system” is one of the promising applications. Optical fibers act as sensor to measure distribution of strain and/or pressure along it. By embedding the fiber in structures and materials, such as buildings, bridges, aircraft fuel-tanks and pipe-lines, we can realize health monitoring function for these to develop “smart structures and smart materials.” Quite a high spatial resolution and measurement speed, compared with conventional time domain techniques, have been realized by applying the SOCF technique.

Key words: optical fiber sensors, smart structures, smart materials, distributed sensing, multiplexed sensing

光ファイバーセンサー技術領域での最近の話題は、光ファイバーに沿う温度や歪み、側圧といった諸量を、光ファイバー中を伝搬する光波属性の変化として分布的にとらえる技術¹⁾や、光ファイバーに沿って多くのセンサーを多点配置した多重化センサーである²⁾。ビル、橋、トンネル内壁、ダム、高速道路等の構造物や、航空機の翼や圧力隔壁、燃料タンク等に光ファイバーを貼り付け巡らせることによって、光ファイバーに沿った歪み、側圧、温度などを分布的にセンシングすることにより、これらの構造や材料の診断を可能とする。

このような材料・構造を、筆者は「痛みのわかる材料・構造」と名づけた。また、ここでセンサーとなる光ファイバーを、「光ファイバー神経網」とよぶ。

本稿では、光ファイバーに沿って分布する物理量を位置の関数として測定するための技術として、光源の干渉状態を任意に合成する「光波コヒーレンス関数の合成法」を紹介

する。本技術により、「痛みのわかる材料・構造のための光ファイバー神経網」では、従来法を数百倍も凌ぐ空間分解能や10万倍も凌ぐ測定速度が達成されている。

1. 光波コヒーレンス関数の合成法

分布型光ファイバーセンシングでは、散乱や非線形光学現象等、光ファイバーが有する物理がセンシング原理として機能する。これまでの分布型センシングでは、反射分布情報を得るために、おもに光パルスを入射してその反射光を時間分解測定してきた¹⁾。しかし、これでは空間分解能は約1mが限界であり、微弱な光パルス応答を積算する必要から測定時間は数分もかかっていた。

これに対して、連続光(CW光)を用いればS/N比の向上が図られ、その結果として高速測定の実現等、メリットが出てくる。CW光による分布計測技術として、FMCW法³⁾や低コヒーレンス干渉法⁴⁾が研究されている。しかし、

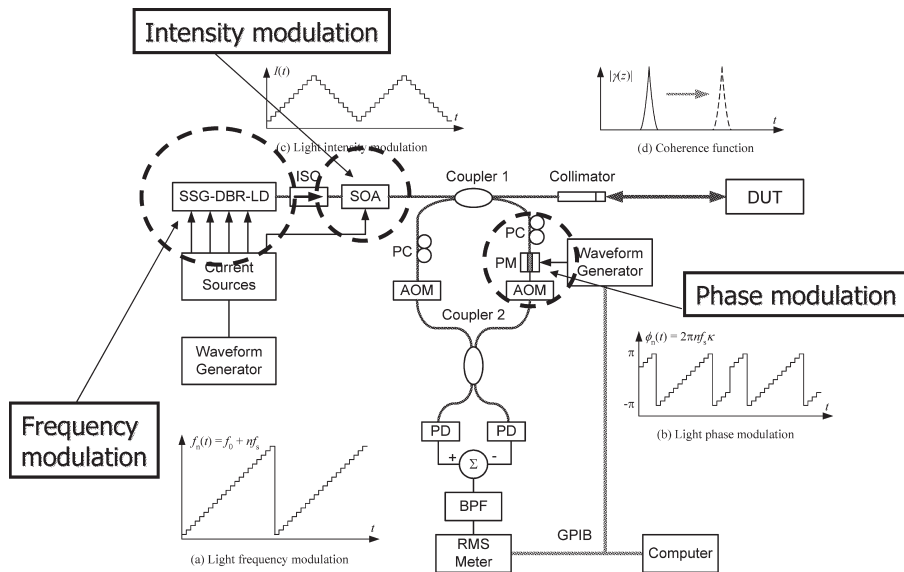


図1 光波コヒーレンス関数の合成技術による干渉計の構成例⁵⁻⁹⁾.

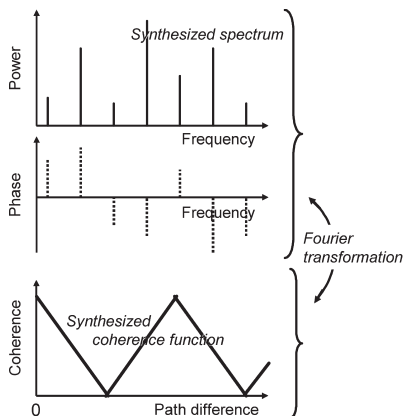


図2 合成された離散的複素スペクトラムと光波コヒーレンス関数.

前者では多量データの解析が必要となり、後者では機械的
可動部分が不可欠となる。これに対して筆者らは、データ
解析も可動部分も不要な CW 光による分布量計測技術と
して、「光波コヒーレンス関数の合成法」を提案・研究し
ている⁵⁻⁷⁾。

その原理を図1に示す。光源として、たとえば、波長可
変半導体レーザーを用い、図1中の(a)に示したように、
発振周波数を階段状に切り換える。これに同期して、それ
ぞれの波長での強度も調整する。さらに、干渉する2光の
相対位相も変化させる。このようにすると、図2に示した
ように、時間平均として、離散的な複素スペクトルが合成
される⁵⁻⁹⁾。2光間の光路差の関数としての干渉縞の規格
化振幅は光波コヒーレンス関数とよばれ、これは図2のス
ペクトル形状のフーリエ変換として与えられる。ここでは
複素離散スペクトルが合成されているので、周期的ではあ

るが、任意形状のコヒーレンス関数が合成できる⁵⁻⁷⁾。

たとえば、等しい周波数間隔をもつ N 対のスペクトル
を合成すると、図3に示すデルタ関数列形状のコヒーレン
ス関数が実現される⁸⁾。これは実験結果であり、特定の光
路長差をもつ2光波間でしか干渉が生じないことを示して
いる。コヒーレンス度がピークの半分になる幅（半値全
幅）をこの選択的干渉の空間分解能と定義すると、周波数
の総変化幅に反比例し、150 GHz の変化幅が空間分解能 1
mm に対応する⁵⁻⁷⁾。さらに、図3に示したように、周波
数変化に比例した位相を付加するだけで、ピーク位置を掃
引することもできる。

図3では、メインピーク以外にサイドローブがみられ
る。これもフーリエ変換の典型的な挙動であり、いわゆる
窓関数を施したアポダイゼーションによって、その抑圧が
可能である。図4(a)は、図1中の強度変調器により各ス
ペクトル成分の強度を調整して、ハミング窓を実現した実
験例である⁸⁾。

上記のように、合成すべき周期的なコヒーレンス関数形
状を設定し、そのフーリエ逆変換（実際にはフーリエ級数
展開の係数）を求めることにより、図1の周波数、強度、
位相の各変調波形が合成できる。図4には、三角形⁸⁾な
らびに台形状⁹⁾のコヒーレンス関数の合成結果も示す。

光源の周波数を正弦波状に変調しても、デルタ関数状の
コヒーレンス関数を合成することができる¹⁰⁾。図5に示し
たように、変調周波数 f_m を変えることでコヒーレンスピー
ークを掃引できる。ここで、空間分解能は、変調振幅 f_m
に反比例する。正弦波状変調では、その時間平均スペクトル
(図5(b))がその周辺で高強度となるため、サイドロ

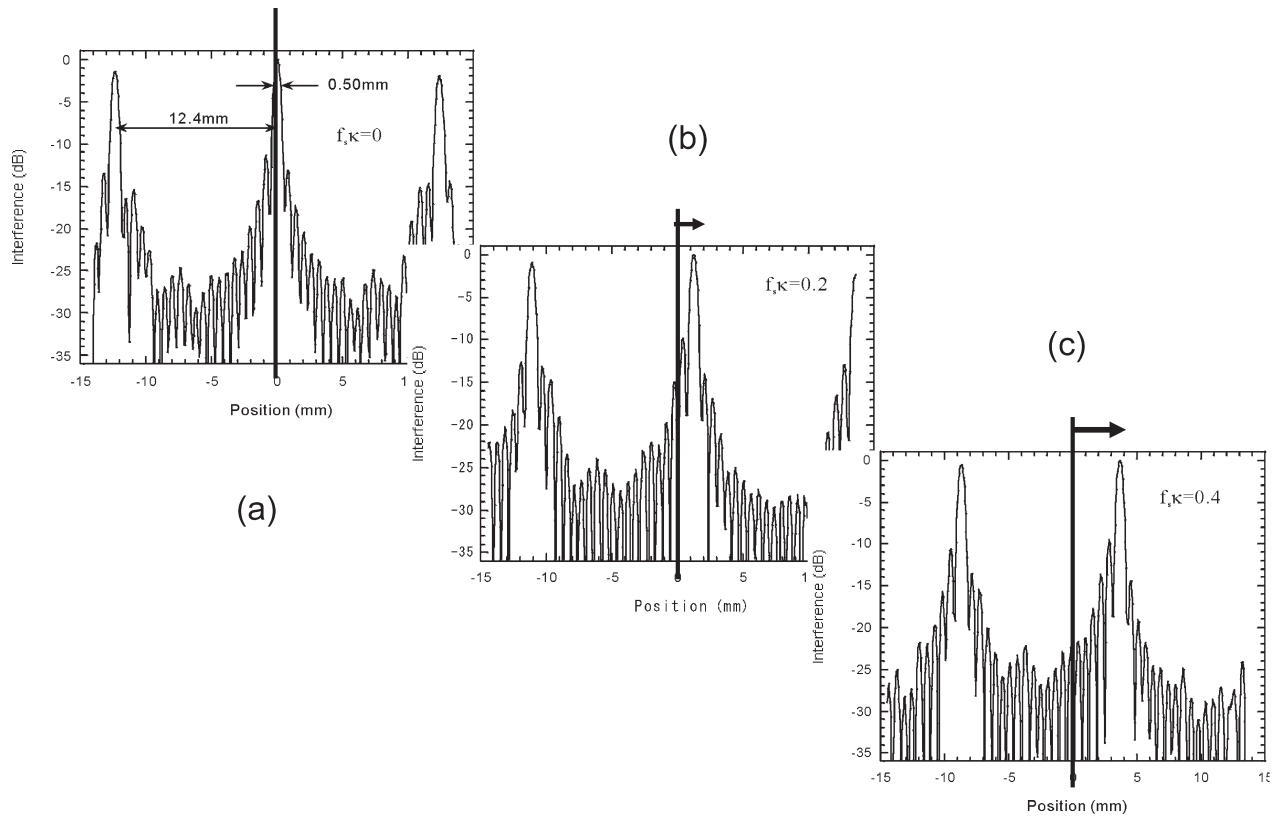


図3 等間隔等振幅離散スペクトルの合成によるデルタ関数列状の光波コヒーレンス関数の合成とピーク位置の掃引⁸⁾.

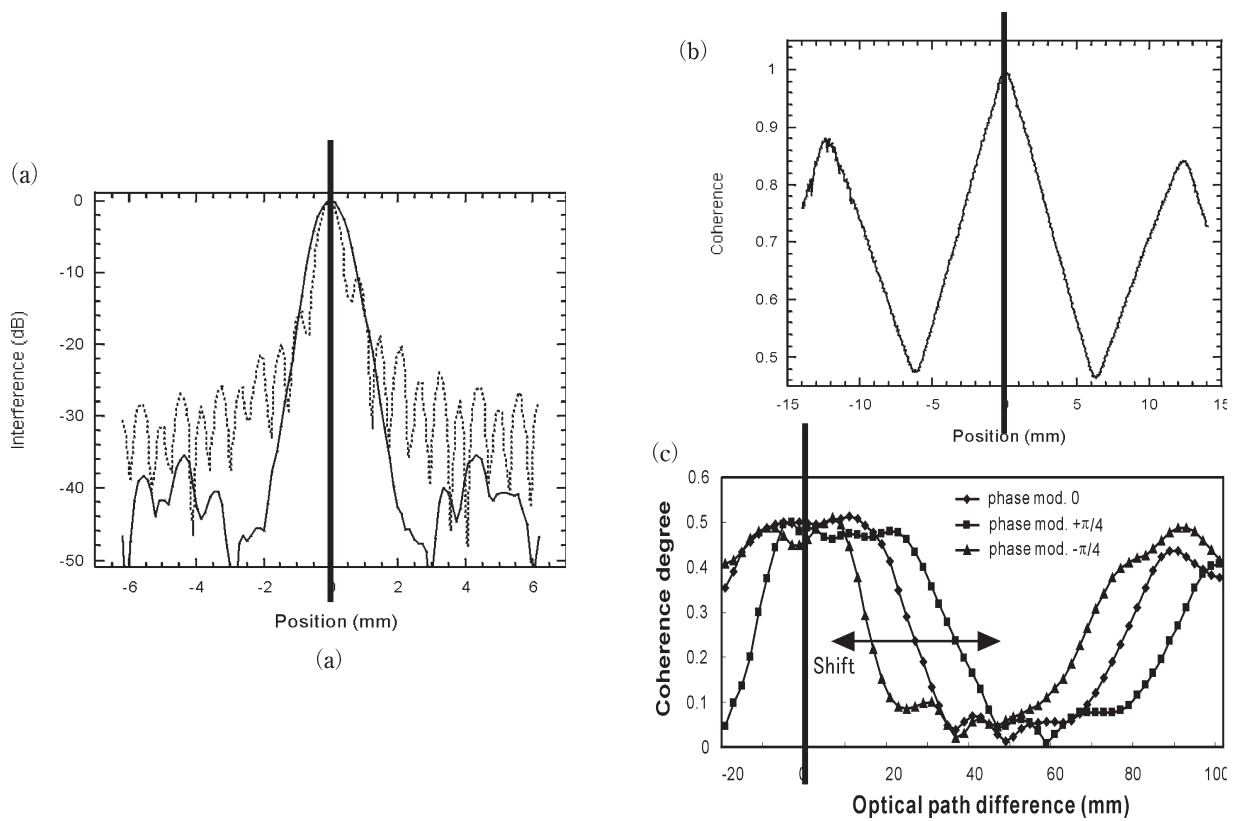


図4 光波コヒーレンス関数の合成例。(a) アポダイゼーション (サイドローブの抑圧)⁸⁾, (b) 三角形⁸⁾, (c) 台形状⁹⁾.

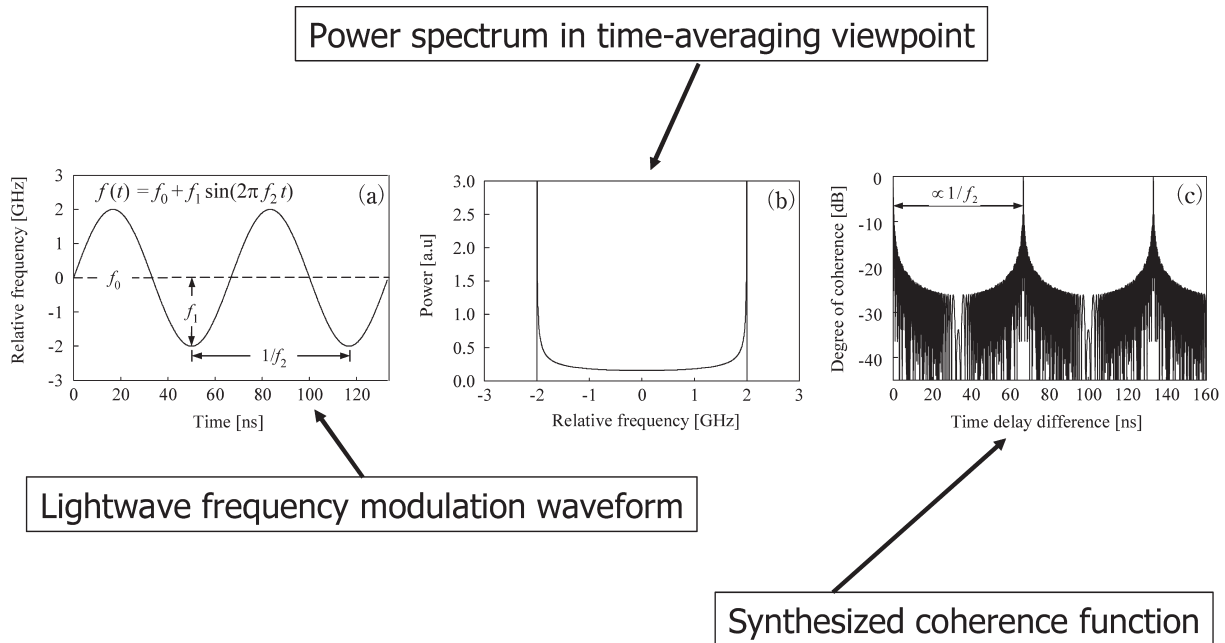


図5 正弦波周波数変調によるデルタ関数列状の光波コヒーレンス関数の合成¹⁰⁾。

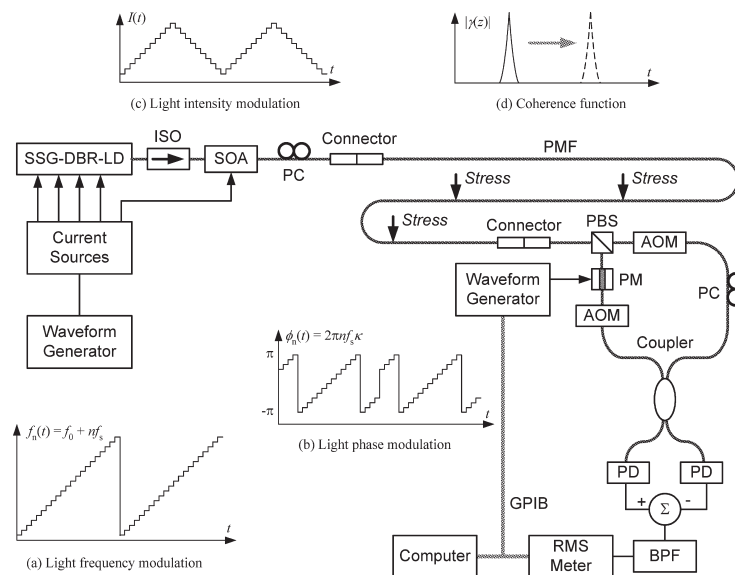


図6 偏波維持光ファイバーの2つの固有偏波モード間の干渉を利用した分布型側圧センシングシステム^{8,21)}。

ープが大きい。強度をも変調することでアポダイゼーションを施せば、これを抑圧することもできる¹¹⁾。

筆者らは、このSOCF技術により、種々のリフレクトメトリー¹²⁻¹⁸⁾、トモグラフィー技術⁷⁾、痛みのわかる材料・構造のための光ファイバー神経網技術を開発してきた。本稿では、「痛みのわかる材料・構造のための光ファイバー神経網」技術を紹介し、その中でSOCF技術の原理をさらに述べよう。

2. 分布型光ファイバー側圧センサー

図6は、偏波維持光ファイバーの固有偏波モードである縦偏波と横偏波が側圧で結合することを利用した、側圧分布センシング系である⁸⁾。両偏波は伝搬速度が異なるので、側圧印加位置に依存した遅延（光路差）が生じる。

光波コヒーレンス関数の合成・掃引法により、デルタ型のコヒーレンス関数を合成・掃引して側圧分布を得る方法を実現した¹⁹⁾。図7(a)のように、SSB-DBR-LD²⁰⁾を導入して20 cmの空間分解能も実現した^{8,21)}。また、三角形

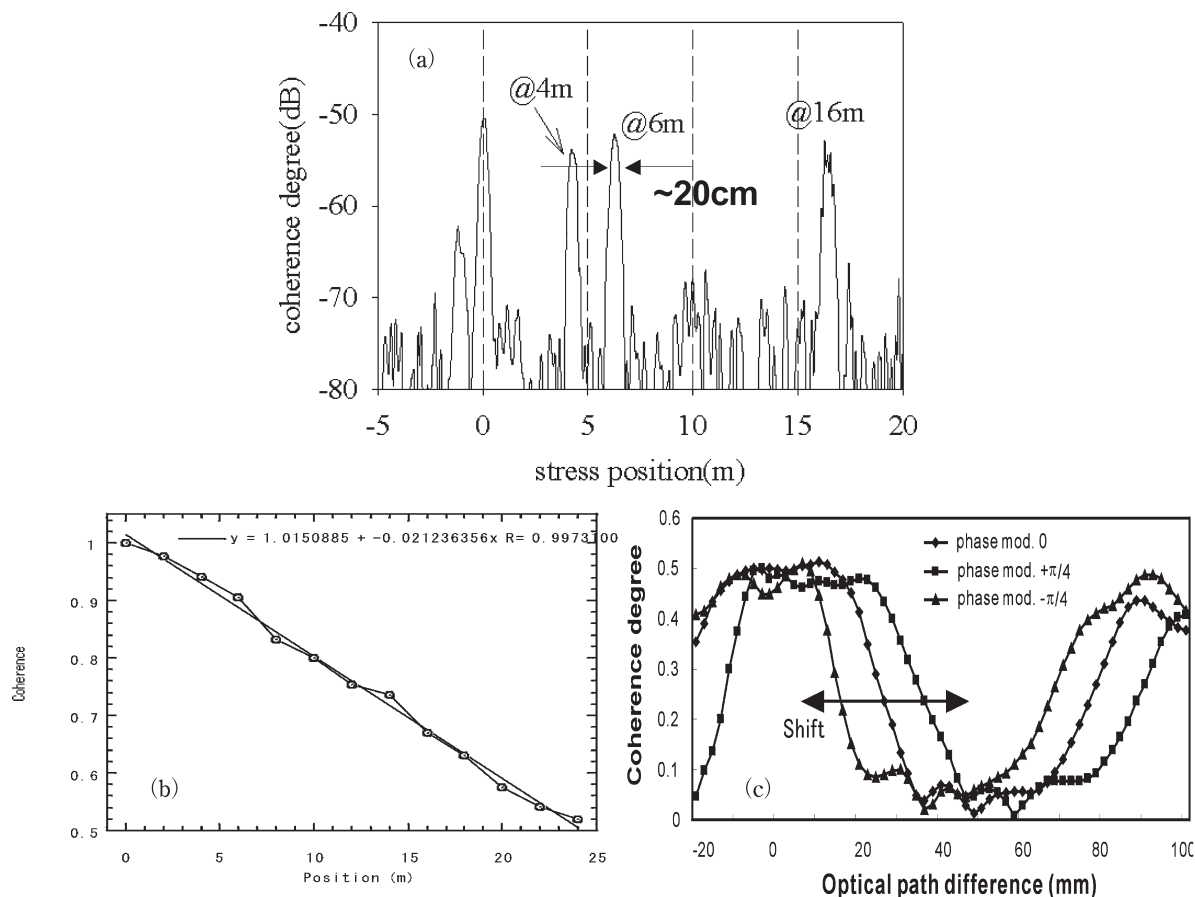


図7 分布型側圧センシングの実験結果。(a) コヒーレンスピークの合成による分布型センシング²¹⁾, (b) 三角形形状のコヒーレンス関数の合成によるアナログ的側圧位置センシング²²⁾, (c) 台形コヒーレンス関数の合成による二分方式側圧位置決定⁹⁾.

のコヒーレンス関数を合成して、荷重印加位置を瞬時に判定できるシステムも実現した (図7 (b))²²⁾。さらに台形コヒーレンス関数を合成し、その0-1変換点を移動することにより、二分法の原理で、加重位置を判定することも可能になった (図7 (c))⁹⁾。

つまり本センシング系では、任意形状のコヒーレンス関数の合成により、複数の測定モードを自在に切り替えることによって測定対象に整合したフレキシブルなセンシングが実現できる。

以上のシステムでは、コヒーレンス関数の合成法によって合成された干渉特性そのものを計測してきた。これに対して、合成された干渉特性によって別の光の属性を制御・合成することもできる。エルビウムドープ光ファイバー中に任意形状のゲイングレーティングを合成する手法²³⁾や、ブリュアン散乱の発生位置を制御する技術が開発されている。

3. ブリュアン散乱光相関領域解析法による分布型歪みセンシング

3.1 測定原理

光ファイバー構成分子の熱振動がつくる微弱な音波の周期が入射光波長の半分になると、音波による回折格子はブラッグ条件を満たし、光は後方に戻る。これがブリュアン散乱である。この散乱光は、速度をもつ音波による反射光であるためにドップラーシフトを受け、約11 GHz周波数が低下する。このシフト量は歪みに比例し、分布型歪みセンシングの原理となる。

従来、分布測定技術としては、光パルスを入射して後方ブリュアン散乱を時間分解する方法^{1,24-27)}が利用されてきた。ここで、空間分解能は光パルスの幅で決まる。

一方で、ブリュアン散乱のスペクトル幅は約30 MHzであるので、これよりスペクトル幅の広い光では、ブリュアンスペクトルの中心周波数変化、つまり歪み変化を精度高く測ることは難しい。このため、光パルス幅には下限があり、空間分解能の基本的な限界は、約1 mとなる²⁵⁾。

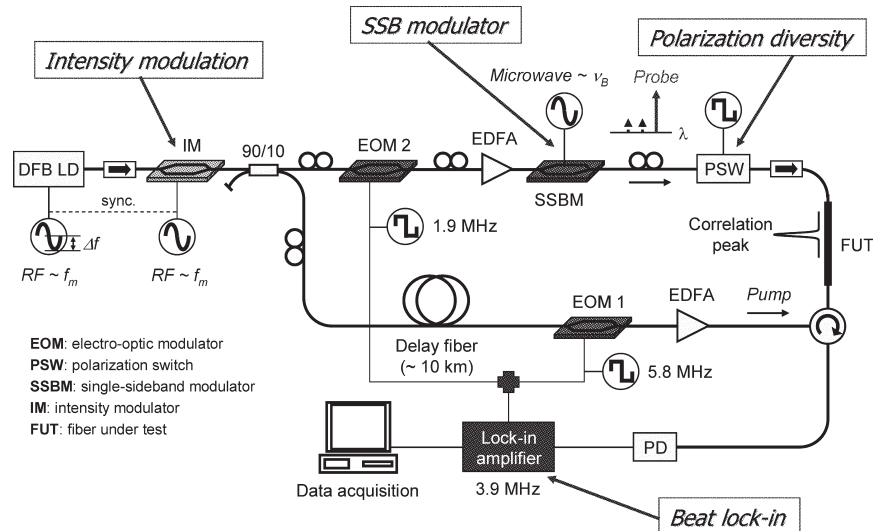


図8 プリユアン散乱光相関領域解析法 (BOCDA 法) のシステム構成²⁸⁾.

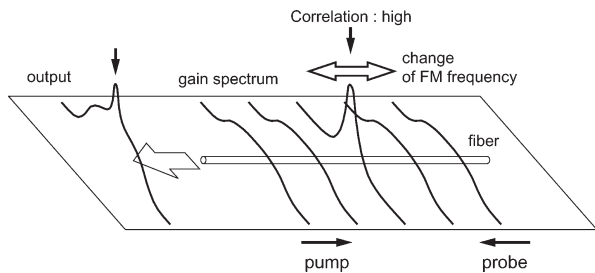


図9 光波コヒーレンス関数の合成による誘導ブリユアン散乱の位置選択的な励起.

また、散乱光は微弱であるため、光パルスへの応答を多数回積分しなくてはならず、測定には数分間も要していた。最近、いくつかの工夫により 10 cm 程度の分解能が示されてはいるが、精度を保った測定速度の向上は難しい。

これに対して、筆者らは、コヒーレンス関数の合成法により、誘導ブリユアン散乱を制御する技術を開発した。「ブリユアン散乱光相関領域解析法：BOCDA: Brillouin optical correlation domain analysis」と名づけたこの技術のシステム構成を図8に示す。本図は、最近導入した性能向上策を複数含むシステムである²⁸⁾。

被測定光ファイバーに連続光であるポンプ光とプローブ光を対向伝搬させ、両者にあらかじめブリユアンシフト周波数相当の周波数差を設けておく。光ファイバー中の非線形現象のために生じる差周波数の電磁波が熱振動を増強する。この結果、誘導ブリユアン散乱が発生する。

ここで、レーザー光源の発振周波数を正弦波で変調して、光ファイバー中にコヒーレンスピークを合成する。すると、このピーク位置でのみ、誘導ブリユアン散乱を効率

的に発生させることができる。

ポンプとプローブの周波数差を掃引して、図9に示したように、ブリユアンゲインスペクトルを測定すると、ピーク位置でのみローレンツ型のスペクトルが得られ、その他の位置では平坦なスペクトルとなる。光ファイバーの一端で得られるスペクトルは図9の左端の形状となり、コヒーレンスピーク位置でのブリユアン周波数シフトがわかる。この誘導散乱が局在発生する位置は、変調周波数を変化させて掃引できるので、分布センシングが可能となる²⁹⁾。

本技術により、光パルス法の原理的限界を約 100 倍凌ぐ 1 cm の空間分解能が実現された³⁰⁾。また、光パルス入射・時間分解法では数分に一度のサンプリング測定しかできず、歪みのダイナミックな測定は困難である²⁴⁻²⁷⁾。これに対して、BOCDA 法によれば、ある測定点に対しては、常に連続光が到来しており、高速測定が可能である³¹⁾。57 Hz のサンプリング速度でブリユアン散乱スペクトルが測定され、振動歪みもセンシングされている。これは、従来技術を約 1 万倍も凌ぐ測定速度である。

このように高い空間分解能を活用して、鉄筋コンクリートに発生するサブミリメートルクラックの検出実験³²⁾にも成功した。また、ビルディングモデルに貼り付けた光ファイバーの任意の 2 点の歪みを、同時に動的計測することにも成功している³³⁾。

BOCDA 法の測定レンジを拡大する技術³⁴⁾も開発されている。繰り返し現れる測定位置 (コヒーレンスピーク) の間隔に等しい広いパルスを用い、受光器出力にタイミングをとりつつ時間ゲートをかけることによって、広い測定レンジ中で 1 個所の情報だけを取得できるようにした。こ

の「時間のゲート法」により可搬型のシステムが試作され、5 cm の空間分解能で 500 m の測定レンジが実現されている³⁵⁾。

3.2 BOCDA 法の性能向上

図 8 中の偏波スイッチは、測定レンジの拡大に伴い問題となる偏波変動の影響を低減するために導入された。このデバイスにより、直交 2 偏波を時分割発生させてそれぞれについてスペクトル測定を行い、二乗和の平方根をとることによって安定なブリュアンスペクトルを取得できる²⁸⁾。

図 10 は、光ファイバーに沿って発生するブリュアン散乱スペクトルの形状をより詳細に描いたものである³⁶⁾。測定点では、ローレンツ型のブリュアン散乱スペクトルが得られる。一方、それ以外の部分では広がったスペクトルとなる。図 (b) に示したように、光ファイバー端点で測定されるスペクトルはこれらを合算した形状となる。富士山形の不要スペクトルにローレンツ型の測定対象スペクトルが乗っている。測定点に歪み加わると、ローレンツ型スペクトルは富士山の斜面を滑り落ちる。歪みが大きくなると、ローレンツ形状の高さが富士山形スペクトルより低くなり、歪み測定ができなくなる。この問題は、同図に示したように、測定レンジが長くなるとより顕著になる。

この問題を解決する方法として、強度変調法を提案した。つまり、図 8 で光源の直後に設けた光強度変調器により、周波数変調に同期させて強度も変化させる。強度変調も施して、時間平均スペクトルの中央部で強度を高める

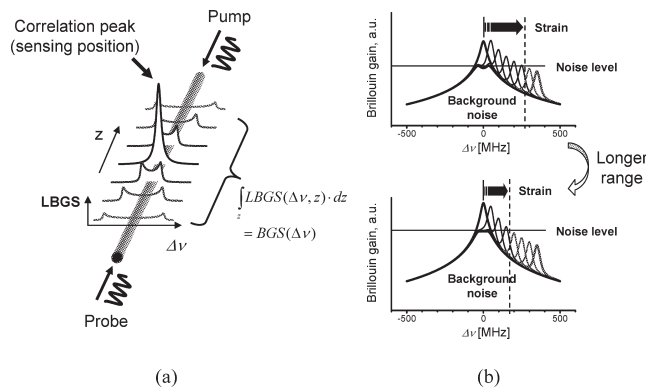


図 10 不要ブリュアンスペクトルによる測定位置歪み量の制限³⁶⁾。

と、富士山形状の不要スペクトルの山頂を削り取ることができることがわかった。

通常の単一モード光ファイバー (SMF) に短尺 (30 cm) の分散シフト光ファイバー (DSF) を融着接続して、長さ 1 km の被測定サンプルを用意した。2 種類の光ファイバーのブリュアン周波数シフトの差は約 300 MHz であって、6000 $\mu\epsilon$ (マイクロストレイン ($\mu\epsilon$) は 10^{-6} の歪み) の歪み量に相当する。このように大きな歪みで測定レンジが長い場合には、図 10 (b) に示した現象が顕著に起こり測定ができなくなる。

これに対して、強度変調を併用してスペクトルを最適化すると、図 11 (a), (b) に示したように、富士山形の不要

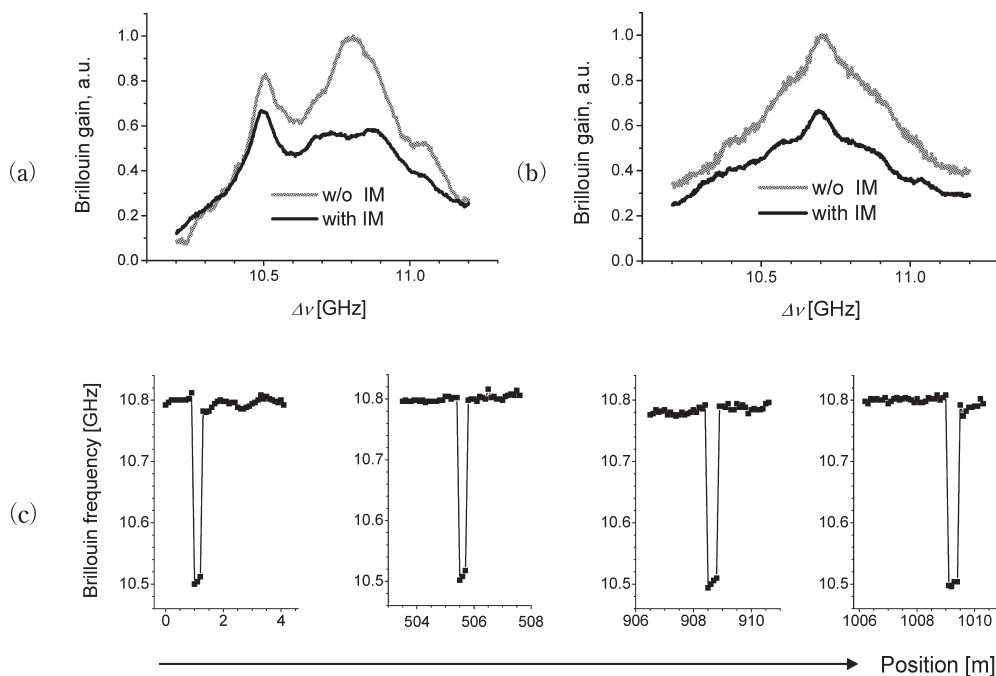


図 11 強度変調によるスペクトルの軽減 (a) (b) と長尺分布測定 (c)³⁶⁾。

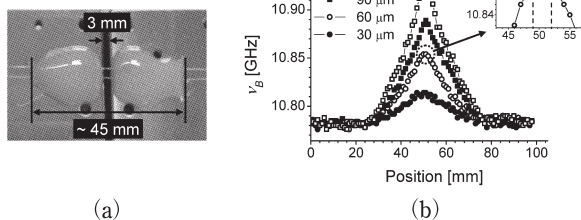


図 12 BOCDA 法による空間分解能 1.6 mm の実現³⁷⁾.

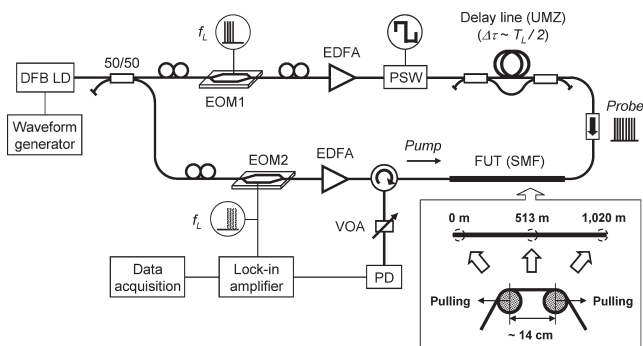


図 13 ポンプ・プローブ時分割発生法と時間ゲート法を併用した BOCDA システム⁴¹⁾.

スペクトルを低くすることができている。同図 (c) に示したように、1 km にわたり比較的大きな歪み量の変化を分布測定することに成功した。

このとき、空間分解能は 28 cm であり、測定レンジは 1050 m であった。その比率は約 3500 であり、これまでの測定に比べ約 10 倍の改善を実現した³⁶⁾。

空間分解能は、光源の周波数変調速度ならびに変調振幅に反比例する³⁷⁾。図 12 は、ミリメートルオーダーの空間分解能に挑んだ結果である³⁸⁾。図 (a) のように、間隙 3 mm を空けて光ファイバーを微動台に固定して、間隙を伸ばすことで歪みを与えた。図 (b) が得られた歪み分布である。接着剤が柔軟なエポキシ系であったため、接着部分で歪みが徐々に変化していることもわかる。空間分解能は 1.6 mm であった。これまでの BOCDA 法での達成値を、さらに 60 倍改善した。

3.3 簡素化 BOCDA システム

システムの簡素化・低価格化技術³⁹⁾も開発した。基本システムでは、光 SSB 変調器をマイクロ波発振・掃引器で駆動して、ポンプ・プローブ光間の周波数差を実現していた。これに対し、半導体レーザーの直接周波数変調特性によりポンプ光とプローブ光を時分割発生させる技術である³⁹⁻⁴²⁾。

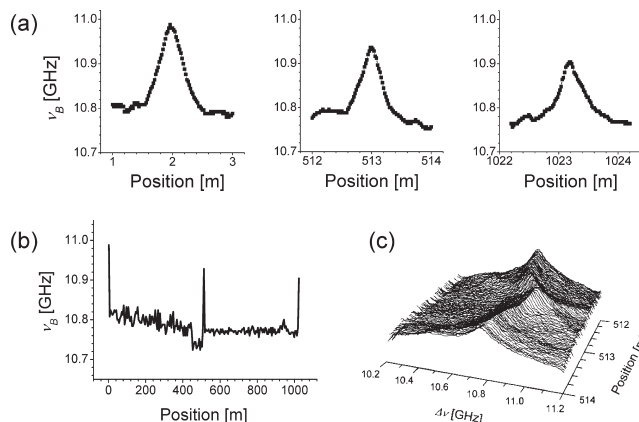


図 14 図 13 のシステムによる測定レンジの向上⁴¹⁾.

図 13 は、低コスト化 BOCDA 法における測定レンジの向上を図るために新たに考案したシステムである^{40,41)}。BOCDA 法では、空間分解能を高くするためにはレーザーの周波数変調の振幅を大きくとり、その周波数を速くする必要がある。周波数を速くすることは、相関ピークの間隔が狭くなることを意味する。このピーク間隔は測定レンジを制限するので、対策が必要である。そこで考案されたのが、上述した時間ゲート法である³⁴⁾。

この BOCDA システムにより、時間ゲートの効果を利用して、長尺光ファイバーに沿う歪み分布を高い空間分解能で測定する実験を行った。結果を図 14 に示す⁴¹⁾。被測定ファイバーの全長は 1020 m である。図 (a) は、3 箇所歪み印加部分近辺でのブリュアン周波数シフト分布の測定結果であり、歪みが加わっている様子が測定されている。空間分解能は 7 cm であった。図 (b) は全長にわたるブリュアン周波数シフト分布を、また図 (c) は中央部分でのブリュアンスペクトル形状の分布を、それぞれ測定した結果である⁴¹⁾。この実験では、レンジと分解能の比は 14000 を超える。

BOCDA 法の基本系における測定速度は、ブリュアン散乱スペクトル形状を測定するために必要なポンプ光とプローブ光間の周波数差を掃引するのに要する時間で決まっていた。つまり、この周波数差を実現するためのマイクロ波発振器の周波数掃引速度が現実的な制限要因となっていた。これに対して、簡素化 BOCDA システムでは、この掃引は半導体レーザーへ加える補償電流波形の振幅を変化させるだけで実現でき、高速化が可能である。

図 15 は、サンプリング速度 1 kHz の達成例である。100 Hz の動的歪みに 2 Hz と 10 Hz の振幅変調あるいは周波数変調を施した場合の測定結果が示されている⁴²⁾。

BOCDA 法では、ポンプ光とプローブ光による誘導ブリ

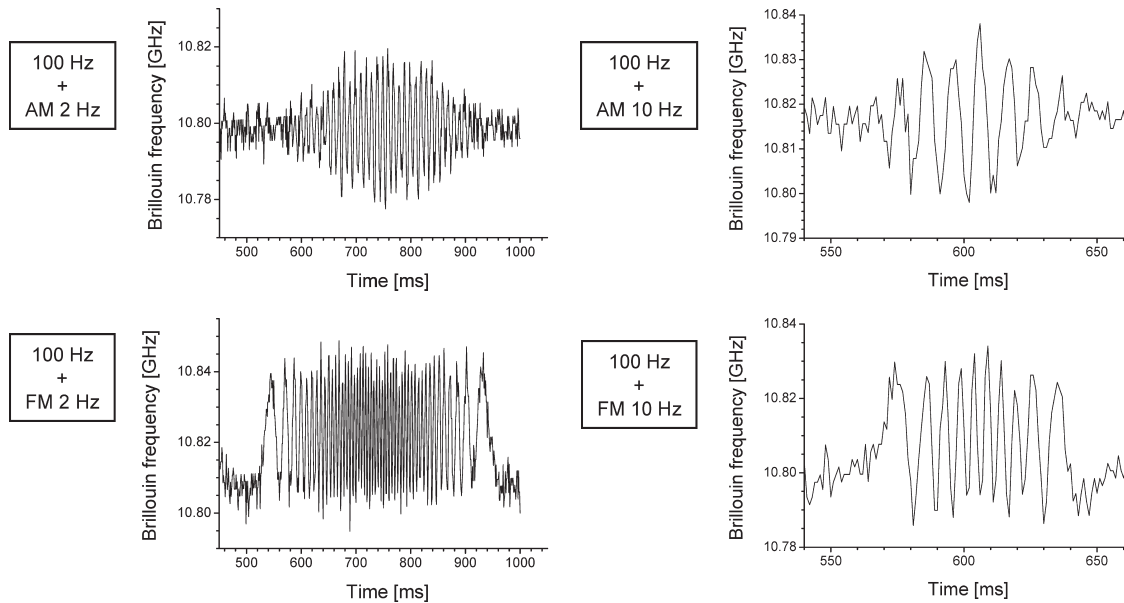


図15 ポンプ・プローブ時分割発生方式 BOCDA による 1 kHz のサンプリング速度の実現⁴²⁾.

ユアン散乱を利用している。この結果、自然ブリュアン散乱を利用する方法に比べて高い信号対雑音比が得られる。しかし、一方で、ポンプ光とプローブ光を対向伝搬させる必要があるために、被測定光ファイバーはループ状になっていることが要求される。このため、センシング光ファイバーに破断が生じると、すべてのポイントで測定が完全に不可能となってしまう。

そこで、光ファイバーの片端からのみ光を導入する新たな方法として、ファイバーブリュアン光相関領域リフレクトメトリー法 (BOCDR 法: Brillouin optical correlation domain reflectometry 法) も提案・実証されている⁴³⁾。

4. 同一ブラッグ波長 FBG による光ファイバー神経網

光ファイバーブラッググレーティング (FBG) は、そのブラッグ反射波長が歪み依存性をもつため、歪みセンサーとして活用されている²⁾。多点化には、従来、ブラッグ波長の異なる FBG を用いた波長多重技術が利用されてきた。しかし、これでは多種類の FBG が必要となって高価となる。また、多重化数は光源の波長範囲で決まり、あまり多くはできない。この問題を解決するために、同一のブラッグ波長をもつ FBG を多重化できる技術が提案されている^{44,45)}。ここでは、光波コヒーレンス関数の合成法による手法を述べる^{10,46,47)}。

図 16 (a) に構成図を示す¹⁰⁾。通常の通信用 DFB-LD を正弦波で周波数変調して、デルタ関数型のコヒーレンスピークを合成する。このコヒーレンスピークにより 1 つの FBG を選択でき、歪みによるその反射波長変化を、LD

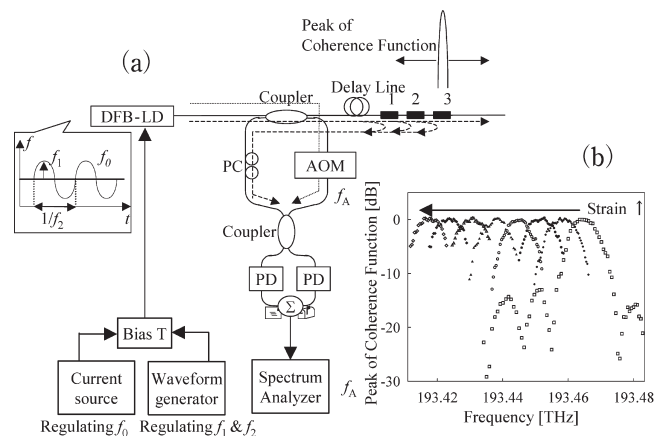


図 16 光波コヒーレンス関数の合成法による同一ブラッグ波長 FBG の多重化システム¹⁰⁾。

の中心周波数を掃引して測定する。同図 (b) に結果を示す。また、図 17 は、各 FBG へのランダムアクセス機能と、高速サンプリング機能を実証した結果である。10 kHz のサンプリング速度を実現した⁴⁶⁾。

最近、測定レンジ中に複数の FBG とコヒーレンスピークを存在させ、その相対位置を調節して、ある 1 つの FBG とある 1 つのピークのみが一致するようにして、多点化を実現する技術 (バーニア法) も提案実証されている^{47,48)}。

図 18 は、長尺 FBG 内の歪み分布を SCOF 技術により測定するシステム構成である⁴⁹⁾。合成されるコヒーレンスピークに付随するサイドローブを抑圧する技術を導入して、歪み分布測定に成功した。図 19 は、FBG の一部を熱した際のブラッグ波長分布の測定結果である⁴⁹⁾。

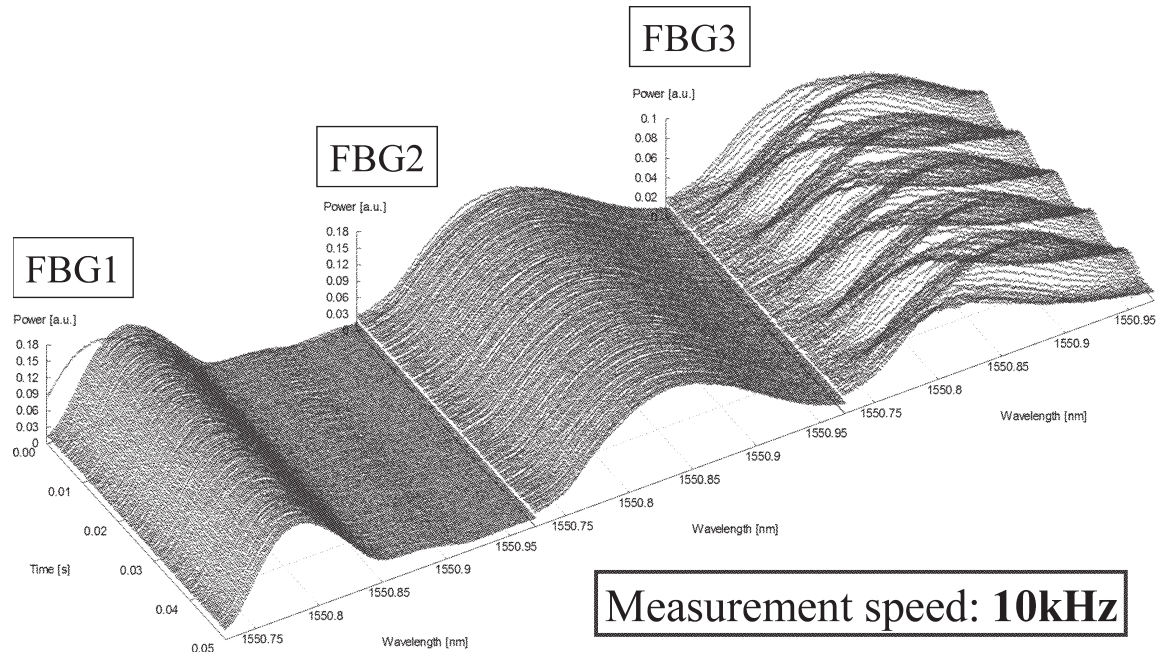


図17 図16のシステムによるサンプリング速度10kHzの達成⁴⁶⁾.

5. ま と め

光波コヒーレンス関数の合成法による光ファイバー干渉形を活用した、「痛みのわかる材料・構造」のための「光ファイバー神経網技術」を紹介した。ミリメートルオーダーの空間分解能や10kHzの高速サンプリング、さらにはランダムアクセス機能等が実現されている。BOCDAでは可搬型装置も開発され³⁵⁾、小型ジェット機に搭載して航空機のヘルスマonitoringの実証にも成功している⁵⁰⁾。また、温度と歪みの分離測定法の提案・実証も進んでいる^{51,52)}。「光ファイバー神経網」技術を中心とする「安全・安心のためのファイバーセンサーフォトンクス」が進展することを期待したい。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金「特別推進研究」(2001~2003年度)、「学術創成研究」(2004~2008年

度)、21世紀COEプログラム(2002~2006年度)ならびにグローバルCOEプログラム(2007~2011年度)のもとに行われたものである。本稿をまとめるにあたりご助力をいただいた、本学電気系工学専攻の何准教授に感謝いたします。

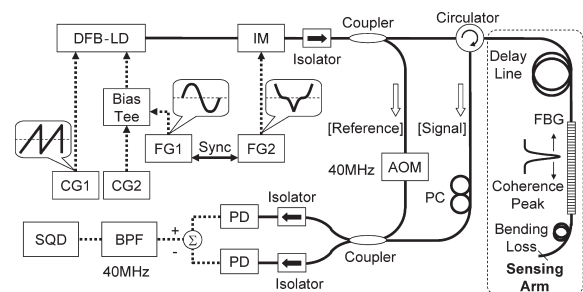


図18 長尺FBG中のブラッグ波長分布センシングシステム⁴⁹⁾.

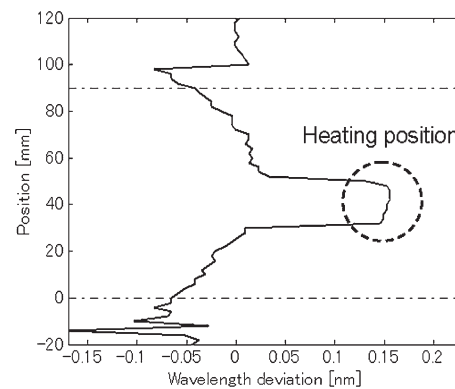
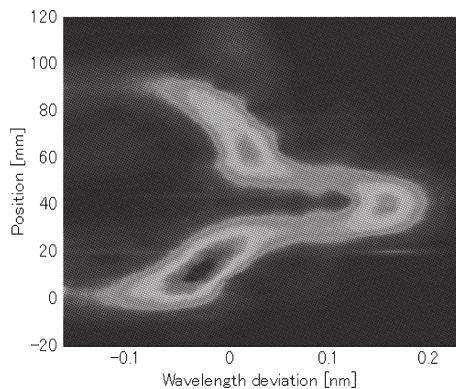


図19 長尺FBG内のブラッグ波長分布測定結果⁴⁹⁾.

文 献

- 1) T. Horiguchi, A. Rogers, W. C. Michie, G. Stewart and B. Culshaw: "Distributed sensors: Recent development," *Optical Fiber Sensors IV*, eds. J. Dakin and B. Culshaw (Artech House, Norwood, MA, 1997) pp. 309-368.
- 2) A. D. Kersey: "Multiplexing techniques for fiber-optic sensors," *Optical Fiber Sensors IV*, eds. J. Dakin and B. Culshaw (Artech House, Norwood, MA, 1997) pp. 369-407.
- 3) K. Tsuji, K. Shimizu, T. Horiguchi and Y. Koyamada: "Spatial-resolution improvement in long-range coherent optical frequency domain reflectometry by frequency-sweep linearisation," *Electron. Lett.*, **33** (1997) 408-410.
- 4) J. A. Izatt, M. R. Hee, G. M. Owen, E. A. Swanson and J. G. Fujimoto: "Optical coherence microscopy in scattering media," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 590-592.
- 5) K. Hotate: "Application of synthesized coherence function to distributed optical sensing," *IOP Meas. Sci. Technol.*, **13** (2002) 1746-1755.
- 6) K. Hotate: "Fiber sensor technology today," *Optical Fiber Technology* (Academic Press, New York, 1998) pp. 356-402.
- 7) K. Hotate and Z. He: "Synthesis of optical coherence function and its applications in distributed and multiplexed optical sensing," *J. Lightwave Technol.*, **24** (2006) 2541-2557.
- 8) Z. He and K. Hotate: "Distributed fiber-optic stress-location measurement by arbitrary shaping of optical coherence function," *J. Lightwave Technol.*, **20** (2002) 1715-1723.
- 9) K. Hotate, A. Kuramoto and Z. He: "Optical fiber stress-location measurement by synthesis of binary optical coherence function," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 578-580.
- 10) K. Hotate, M. Enyama, S. Yamashita and Y. Nasu: "A multiplexing technique of fiber Bragg grating sensors with the same reflection wavelength by the synthesis of optical coherence function," *IOP Meas. Sci. Technol.*, **15** (2004) 148-153.
- 11) M. Enyama and K. Hotate: "Dynamic and random-access strain measurement by fiber Bragg gratings with synthesis of optical coherence function," *SPIE Optics East* (Philadelphia, 2004) 5589-20, pp. 144-153.
- 12) K. Hotate and K. Makino: "High spatial resolution fiber optic distributed force sensing with synthesis of optical coherence function," *SPIE Photonics East* (Rhode Island, 2003) 5272-23, pp. 157-161.
- 13) T. Saida and K. Hotate: "High spatial resolution reflectometry by synthesis of optical coherence function for measuring reflectivity distribution at a long distance," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **10** (1998) 573-575.
- 14) M. Kashiwagi and K. Hotate: "Elongation of measurement range by successively shifting measurement window in a high spatial resolution reflectometry for optical subscriber networks by synthesis of optical coherence function," *IOP Meas. Sci. Technol.*, **15** (2004) 1512-1518.
- 15) M. Kashiwagi and K. Hotate: "Measurement range elongation in a high spatial resolution reflectometry for optical subscriber networks by synthesis of optical coherence function," *17th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Bruges, 2005) We1-4, pp. 270-273.
- 16) M. Kashiwagi and K. Hotate: "Improvement of dynamic range in reflectometry by synthesis of optical coherence function at region beyond the coherence length," *IQEC/CLEO-PR 2005* (Tokyo, 2005) pp. 1584-1585.
- 17) Z. He, S. Yoshiyama, M. Enyama and K. Hotate: "High-reflectance-resolution optical reflectometry with synthesis of optical coherence function," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) L117-L119.
- 18) Z. He, M. Konishi and K. Hotate: "A high-speed sinusoidally-frequency-modulated optical reflectometry with continuous modulation-frequency sweeping," *19th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-19)* (Perth, 2008) 7004-201.
- 19) T. Saida and K. Hotate: "Distributed fiber optic stress sensor by synthesis of the optical coherence function," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **9** (1997) 484-486.
- 20) Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura, Y. Kondo and M. Yamamoto: "Broad-range wavelength-tunable superstructure grating (SSG) DBR laser," *J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 1817-1823.
- 21) K. Hotate, K. Makino, Z. He, M. Ishikawa and Y. Yoshikuni: "High spatial resolution fiber-optic distributed lateral-stress sensing by stepwise frequency modulation of a superstructure grating distributed Bragg reflector laser diode," *J. Lightwave Technol.*, **24** (2006) 2733-2740.
- 22) K. Hotate, X. Song and Z.-Y. He: "Stress-location measurement along an optical fiber by synthesis of triangle-shape optical coherence function," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **13** (2001) 233-235.
- 23) X. Fan, Z. He and K. Hotate: "A novel distributed strain sensor based on dynamic grating in polarization-maintaining Erbium-doped fiber," *Opt. Lett.*, **23** (2008) 1647-1649.
- 24) T. Horiguchi, K. Shimizu, T. Kurashima, M. Tateda and Y. Koyamada: "Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering," *J. Lightwave Technol.*, **13** (1995) 1296-1302.
- 25) A. Fellay, L. Thevenaz, M. Facchini, M. Nikles and P. Robert: "Distributing sensing using stimulated Brillouin scattering: Toward ultimate resolution," *12th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Williamsburg, 1997) pp. 324-327.
- 26) M. N. Alahbabi, Y. T. Cho and T. P. Newson: "100 km distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter," *IOP Meas. Sci. Technol.*, **15** (2004) 1539-1543.
- 27) N. A. Heron, X. Bao, D. J. Webb and D. A. Jackson: "Brillouin loss based distributed temperature sensor using a single source," *11th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Sapporo, 1996) pp. 630-633.
- 28) K. Hotate, K. Abe and K.-Y. Song: "Suppression of signal fluctuation in Brillouin optical correlation domain analysis system using polarization diversity scheme," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **18** (2006) 2653-2655.
- 29) K. Hotate and T. Hasegawa: "Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique—Proposal, experiment and simulation—," *IEICE Trans. Electron.*, **E83-C** (2000) 405-412.
- 30) M. Tanaka and K. Hotate: "Application of correlation-based continuous-wave technique for fiber Brillouin sensing to measurement of strain distribution on a small size material," *Photonics Technol. Lett.*, **14** (2002) 675-677.
- 31) K. Hotate and S. S. L. Ong: "Distributed dynamic strain measurement using a correlation-based Brillouin sensing system," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15** (2003) 272-274.
- 32) S. S. L. Ong, H. Kumagai, H. Iwaki and K. Hotate: "Crack detection in concrete using a Brillouin optical correlation domain analysis based fiber optic distributed strain sensor," *16th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Nara, 2003) We3-3, pp. 462-465.

- 33) S. S. L. Ong, M. Imai, Y. Sako, Y. Miyamoto, S. Miura and K. Hotate: "Dynamic strain measurement and damage assessment of a building model using a Brillouin optical correlation domain analysis based distributed strain sensor," *16th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (OSA, Nara, 2003) We3-2, pp. 458-461.
- 34) M. Kannou, S. Adachi and K. Hotate: "Temporal gating scheme for enlargement of measurement range of Brillouin optical correlation domain analysis for optical fiber distributed strain measurement," *16th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-16)*, (OSA, Nara, 2003) We3-1, pp. 454-457.
- 35) 石岡昌人, 鎗 孝志, 長井謙宏, 足立正二, 飯田力弘, 熊谷芳宏, 保立和夫, 櫻井建夫: "航空機搭載型BOCDA分布型光ファイバセンサ", 電子情報通信学会技術研究報告, **OFT2007-10** (2007) 45-50.
- 36) K.-Y. Song, Z. He and K. Hotate: "Effects of intensity modulation of light source on Brillouin optical correlation domain analysis," *J. Lightwave Technol.*, **25** (2007) 1238-1246.
- 37) K.-Y. Song and K. Hotate: "Enlargement of measurement range in a correlation-based Brillouin sensing system using double lock-in amplifiers and a single-sideband modulator," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **18** (2006) 499-501.
- 38) K.-Y. Song, Z. He and K. Hotate: "Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 2526-2528.
- 39) K. Hotate and T. Yamauchi: "Fiber-optic distributed strain sensing system by Brillouin optical correlation domain analysis with a simple and accurate time-division pump-probe generation scheme," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) L1030-L1033.
- 40) K. Hotate and H. Arai: "Enlargement of measurement range of simplified BOCDA fiber-optic distributed strain sensing system using a temporal gating scheme," *17th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Bruges, 2005) Th-1.
- 41) K.-Y. Song and K. Hotate: "Simplified Brillouin optical correlation domain analysis system with optimized time-gating scheme," *CLEO/QELS 2007* (Maryland, 2007) CThO6.
- 42) K.-Y. Song and K. Hotate: "Distributed fiber strain sensor at 1 kHz sampling rate based on Brillouin optical correlation domain analysis," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **19** (2007) 1928-1930.
- 43) Y. Mizuno, W. Zou, Z. He and K. Hotate: "Proposal and experiment of BOCDA —Brillouin optical correlation-domain reflectometry—," *19th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (OSA, Perth, 2008) 7004-122.
- 44) B. A. Childers, M. E. Froggatt, S. G. Allison, T. C. Moore, Sr., D. A. Hare, C. F. Batten and D. C. Jegley: "Use of 3000 Bragg grating strain sensors distribution on four 8-m optical fibers during static load tests of a composite structure," *Proc. SPIE*, **4332** (2001) 133-142.
- 45) L. C. G. Valente, A. M. B. Braga, A. S. Ribeiro, R. D. Regazzi, W. Ecke, C. Chojetzki and R. Willsch: "Combined time and wavelength multiplexing technique of optical fiber grating sensor arrays using commercial OTDR equipment," *IEEE J. Sensor*, **3** (2003) 31-35.
- 46) T. Hayashi, Z. He and K. Hotate: "Multiplexed FBG sensor system by synthesis of optical coherence function with active beat compensation," *18th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (OSA, Cancun, 2006) FA2.
- 47) M. Enyama, Z. He and K. Hotate: "Expansion of spatial measurement range by use of vernier effect in multiplexed fibre Bragg grating strain sensor with synthesis of optical coherence function," *IOP Meas. Sci. Technol.*, **16** (2005) 977-983.
- 48) K. Hotate, K. Matsuo, K.-Y. Song and Z. He: "Multiplexed FBG strain sensing system by synthesis of optical coherence function with time-division phase shift modulation," *SPIE Symposium on Optics East 2007* (Boston, 2007) 6770-7.
- 49) K. Hotate and K. Kajiwara: "Proposal and experimental verification of Bragg wavelength distribution measurement within a long-length FBG by synthesis of optical coherence function," *OSA Opt. Express*, **16** (2008) 7881-7887.
- 50) T. Yari, K. Nagai, M. Ishioka, K. Hotate and Y. Koshioka: "Aircraft structural health monitoring using on-board BOCDA system," *15th Annual Int. Symp. on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring* (San Diego, 2008) 6933-29.
- 51) W. Zou, Z. He and K. Hotate: "High-accuracy discriminative sensing of strain and temperature by use of birefringence and Brillouin scattering in a polarization-maintaining fiber," *19th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Perth, 2008) 7004-105.
- 52) W. Zou, Z. He, K.-Y. Song and K. Hotate: "Correlation-based distributed measurement of SBS-generated dynamic grating spectrum in a polarization-maintaining fiber," *19th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (OSA, Perth, 2008) 7004-305.

(2008年7月16日受理)