

# 高性能 FBG センサモニタ AR4041A/AR4011A の開発

Development of High-performance FBG Sensor Monitor AR4041A/AR4011A

腰原 勝 Masaru Koshihara, 中村賢一 Kenichi Nakamura, 山崎教明 Noriaki Yamasaki, 齊藤崇記 Takanori Saitoh,  
古川 浩 Hiroshi Furukawa

**[要 旨]** モードホップフリーのまま 1.25 kHz で掃引できるシングルモード波長掃引光源を利用した Fiber Bragg Grating (FBG) センサモニタ AR4041A/AR4011A を開発し、その測定精度を評価した。結果として、1510 nm から 1590 nm の波長範囲 80 nm を波長精度 0.08 pm で観測できることを示す。また、本器を用いた歪み測定では、その測定精度は 0.064  $\mu\epsilon$  であり、従来型の FBG センサモニタや電気式歪み測定器と比較し、一桁高精度に測定できることを明らかにする。

**[Summary]** We developed a high-performance Fiber Bragg Grating (FBG) sensor monitor for strain and temperature measurements. The new FBG sensor monitor is composed of a novel wavelength swept light source which can sweep wavelength with single-mode lasing in the range of 110 nm and sweep frequency of 1.25 kHz. The FBG sensor monitor can measure FBG wavelengths with a stability of 0.08 pm (which is corresponding to 0.064  $\mu\epsilon$ ) and a measurement frequency of 1.25 kHz in the range of between 1510 and 1590 nm.

## 1 まえがき

近年、ビルや橋梁など、構造物の健全性、安全性を診断する手段として、ヘルスマニタリング技術の重要性が見直されている。従来の電気式歪みセンサを用いた測定では、個々のセンサに給電の必要があり、電磁ノイズや落雷の影響を受け易く、遠距離測定時には測定した電気信号にノイズ成分が乗じてしまい、測定精度の劣化に繋がる可能性があるなど、多くの問題点があった。

この問題を解決する手段として、光ファイバをセンサとして利用した、光センシング技術が注目されている。光センシング技術では、センサ自身に給電の必要が無く、耐食性に優れ長寿命であり<sup>[1]</sup>、防爆性に優れているため電磁ノイズなどを気にすることなく 10 km 以上の遠距離測定も容易に行えるなど、多くの利点を有している。また、光ファイバの性質を生かし、線状や面状での計測が可能であるなど、厳しい設置環境が求められる自然災害監視や構造物ヘルスマニタリングには最適な技術である。

光センシングにおけるよく知られた技術として、光ファイバ中で発生するブリルアン後方散乱光の周波数変化を測定することにより、構造物の歪み量と温度変化を知ることができる Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) 方式や、光ファイバ中で生じるラマン散乱光の強度を測定することで温度変化を知ることができる Raman Optical Time Domain Reflectometer (ROTDR) 方式、光ファイバのコア部に回折格子を形成した Fiber Bragg Grating (FBG) をセンサとして用いることで、FBG センサからの反射スペクトラムの中心波長変化から、印加された歪み量や温度変

化を測定する方法がある。

BOTDR 方式や ROTDR 方式では、FBG センサを用いた測定技術に比べ、特殊加工を施していない市販の光ファイバ自体がセンサとして機能するため、比較的安価にシステムを構築できる利点がある。しかし、センサ長が長いと測定距離分解能が悪く、また、光ファイバ中を伝搬する微小な光の変化量を捉えるため、測定データの平均化やフィルタリング処理が必要となり、数十秒～数分の測定時間を要する。そのため、リアルタイム性を必要とする測定には不向きである。

他方、FBG センサを用いた測定方式では、反射スペクトラムのダイナミックレンジをある程度確保すれば、比較的容易にリアルタイム測定を実現できる。また、一般的なゲージ長 10 mm 程度の FBG センサを 1 本の光ファイバ上に、多点に、かつ、直列に接続することで、測定距離分解能良く、広範囲の歪み量や温度変化が測定可能である。これら多くの利点から FBG センサを利用した測定方式は、橋梁やダム等の大規模構造物の監視<sup>[1, 2]</sup>や、ゲリラ豪雨時の河川水位監視<sup>[3]</sup>、崖崩れ検知<sup>[4]</sup>、空港施設などの侵入者検知<sup>[5]</sup>、津波到来検知<sup>[6]</sup>等に利用が進められている。

以前我々は、FBG をセンサとして用いた、歪み、温度変化測定器、FBG センサモニタ SF3041A/SF3011A を開発し、2007 年より販売を開始した<sup>[7-13]</sup>。本器には、シリコンウェハから形成した小型ミラー (MEMS: Micro Electro Mechanical Systems スキャナー) を用いた外部共振器構造の波長掃引光源と、受光器、掃引光源の制御やデータ処理を行う信号処理回路部を内蔵している。本器で

は、波長掃引された光を光ファイバを通して FBG センサに入射し、反射された光を受光器で検出することにより、反射スペクトラムと、その中心波長を測定している。

波長掃引光源を用いた FBG センサモニタにおいて、FBG センサの中心波長の測定精度は、内蔵された波長掃引光源の波長揺らぎと、光出力パワーの変動に依存する。FBG センサからの反射スペクトル幅 (<math><0.1 \text{ nm}</math>) 程度の範囲では、波長掃引光源の掃引特性は波長に対しほぼ線形であり、その揺らぎ量は極めて小さい。それに対し、波長掃引光源の内部モードにより引き起こされる光出力パワーの変動は、波長測定精度に大きく影響を与える。我々が以前開発した FBG センサモニタに内蔵されている波長掃引光源は、マルチモードで発振しており、光出力パワーの変動は大きかった。そのため、歪み測定精度は  $2\sim 3 \mu\epsilon$  程度であり、これは一般的な電気式歪み測定器での測定精度 ( $1 \mu\epsilon$  程度) より低い値であった。また、掃引中の発振スペクトル幅は市販の FBG センサの反射スペクトル幅と同程度の  $0.1 \text{ nm}$  程度であったため、観測したスペクトル幅は実際のスペクトル幅より広く観測されていた。

近年我々は、シングルモード発振の状態では  $100 \text{ nm}$  以上の波長域を、より高速に掃引できる新しい波長掃引光源を開発した<sup>[14]</sup>。本掃引光源は、光出力パワーの変動が小さく、掃引中の発振スペ

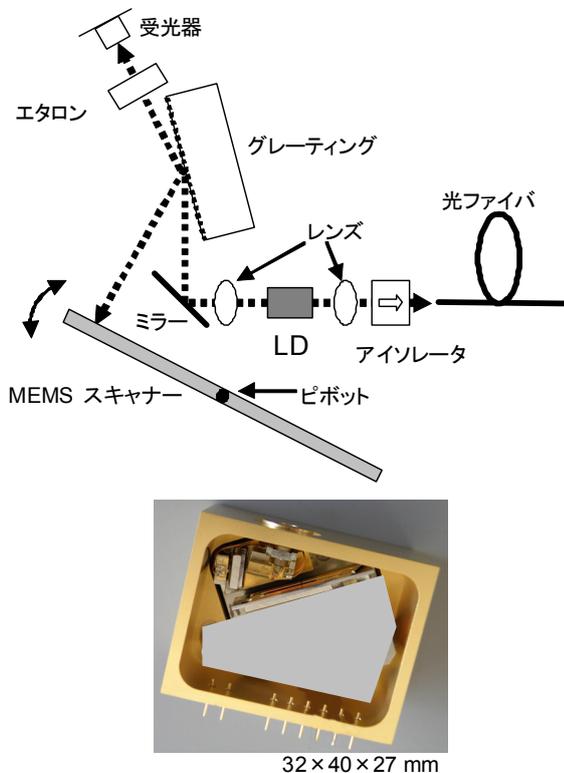


図1 シングルモード波長掃引光源の構成と外観写真  
Schematic diagram and overview of single-mode wavelength swept light source (WSLS).

クトル幅が狭い特徴を持つ。そこで今回、このシングルモード波長掃引光源を用いて FBG センサモニタ AR4041A/AR4011A を開発し、その特性を評価したところ、良好な結果を得たので報告する。

## 2 開発方針

FBG センサモニタは主に、自然災害監視や構造物のヘルスマニタリングで利用されるため、設置時の利便性を図り、小型で、かつ、軽量となるように設計した。また、微小な歪みや温度変化を高速に測定できるよう、 $1 \text{ kHz}$  以上の高速性を保ちつつ、市販されている FBG センサモニタや、従来器より高い測定精度を目指した。FBG センサモニタの制御プログラムに関しては、以前我々が開発した SF3041A/SF3011A の制御プログラムとの互換性を重視し、従来器と同様の制御プログラム画面を用いることで、既にお客様がお持ちの機器の置き換えをスムーズに行えるようにした。制御用パソコンの OS は、Windows XP, Windows Vista, Windows 7 を対象として開発した。

## 3 シングルモード波長掃引光源

### 3.1 発振原理

図 1 に、開発したシングルモード波長掃引光源の構成と外観写真を示す。本掃引光源は、半導体レーザー (LD)、グレーティング、電磁駆動の MEMS スキャナー等を用いて、リットマン型の外部共振器構造を形成している。

LD からミラー側に出射された光は、グレーティングで分光される。LD のグレーティング側の端面は無反射膜を成膜することで、LD 内で生じる内部モードを低減した。グレーティングで分光された光は、MEMS スキャナーで反射され、逆光路を辿り、再び LD まで戻る。LD のアイソレータ側の端面には、低反射膜が成膜されており、MEMS スキャナーとの間に光共振器を形成している。MEMS スキャナーは、電磁石で発生された交流磁界により、図中のピボットを中心に往復回転する。この往復回転により、外部共振器長が変化するため、波長が正弦波状に往復掃引される (図 2 参照)。

MEMS スキャナーは、機械的な共振を利用して回転しているため、その回転角は正弦波状に変化する。これにより、発振波長も同じ周波数で正弦波状に掃引される。ここで、MEMS スキャナーの共振周波数、すなわち、掃引周波数を  $1.25 \text{ kHz}$  とするように設計した。LD の低反射膜が成膜されている端面から出射された光は、レンズ、アイソレータを透過後、出力用光ファイバに結合される。

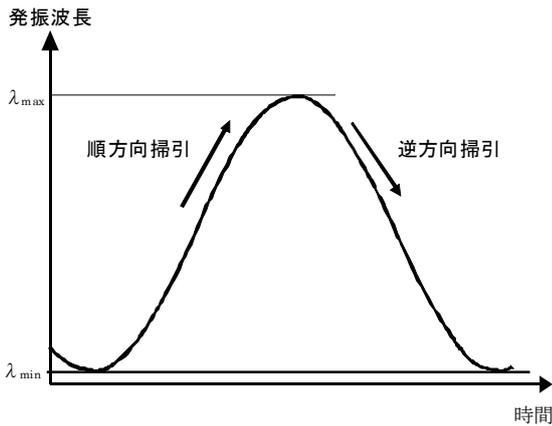


図2 シングルモード波長掃引光源の発振波長の模式図  
Lasing wavelength change of single-mode WSLs during wavelength sweeping.

グレーティングを利用した外部共振器構造のレーザにおいて、シングルモード発振を実現する場合、グレーティングの波長選択幅に対して、外部共振器のモード間隔が広くなければならない。外部共振器のモード間隔は、LD から MEMS スキャナまでの光共振器長に反比例する。そのため本掃引光源では、光源全体を小さく設計して光共振器長を短くし、外部共振器のモード間隔を広くすることにより、シングルモード発振を実現している。また、MEMS スキャナの回転角に対するグレーティングの選択波長の変化率と、LD から MEMS スキャナまでの光学長で決定される外部モード共振波長の変化率を一致させることにより、全発振波長域においてモードホップが発生しない構造を実現している。なお、本掃引光源の掃引波長帯域は、FBG センサモニタに最適な 1550 nm 帯とした。

本掃引光源内部には、波長モニタリング機構が設けられている。波長モニタリング機構では、グレーティングからの 0 次光をフリースペクトラムレンジ 5 nm のエタロンに入射し、このエタロンからの透過プロファイルを受光器で検出することにより、掃引中の発振波長を算出することができる。

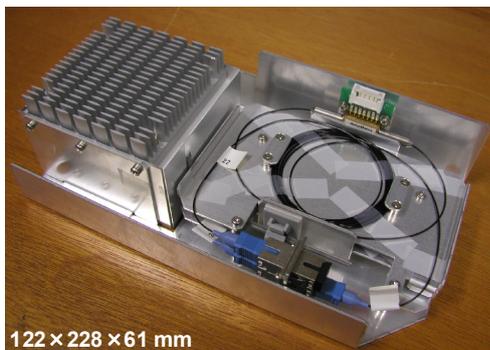


図3 従来型マルチモード波長掃引光源の外観  
Overview of conventional multi-mode WSLs.

光学系全体は、32 mm×40 mm×27 mm の金属筐体に密閉され、ペルチエ素子により、温度安定化されている。図 3 に、従来型マルチモード波長掃引光源の外観写真を示す。従来型掃引光源の大きさは 122 mm×228 mm×61 mm であり、今回開発したシングルモード波長掃引光源は、従来型掃引光源に比べ、体積比にしておよそ 1/50 の小型化を達成した。

### 3.2 掃引中の発振スペクトラムの評価

前述したように、本掃引光源を FBG センサモニタに利用する場合、出力パワー変動の大きさや、掃引中の発振スペクトル幅の狭さが重要である。そこで、本掃引光源の特性を評価した。ここでは、試作した掃引周波数 1.45 kHz のシングルモード波長掃引光源で評価を行ったが、掃引周波数以外の特性は掃引周波数 1.25 kHz の本掃引光源と同様であるため、以降の測定にもこの光源を使用する。

まず、本掃引光源の掃引中における発振スペクトラムを光スペクトラムアナライザで測定した結果を図 4 に示す。横軸は波長、縦軸は光出力パワーである。この測定において、本掃引光源の掃引速度は、光スペクトラムアナライザの測定掃引速度より速いため、得られるスペクトラムは台形状となる。ここでは、安定した測定を行うため、ビデオ帯域幅 10 Hz、測定分解能 0.07 nm の非同期測定とした。

結果より、波長掃引範囲は 1492 nm から 1602 nm の 110 nm であった。また、掃引波長の中心 1550 nm 付近よりも、端部のほうが光出力パワーが強く観測されているが、これは、本掃引光源の発振波長が正弦波状に変化するために、掃引の折り返し付近では掃引速度が 0 になり、その近傍の波長では、光スペクトラムアナライザでの受光時間が長く、光出力パワーが強く観測されるためである。また、掃引範囲内で光出力パワーが 2~3 dB 程度揺らいでいるのが確認できるが、これは、本掃引光源と光スペクトラムアナライザの掃引間に同期が取れていないためであり、後述する実際のパワー揺らぎ (0.1 dB 程度) ではない。

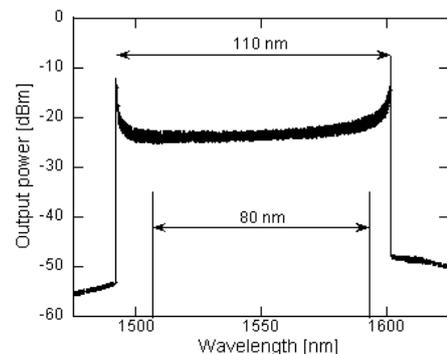


図4 掃引中のシングルモード波長掃引光源のスペクトラム  
Spectrum of single-mode WSLs.

掃引幅 110 nm で掃引された出射光を測定分解能 0.07 nm に設定された光スペクトラムアナライザで観測した場合、その光出力パワーは、およそ 32 dB(=10×log<sub>10</sub>(0.07/110 nm))小さく測定される。本測定結果では、波長 1550 nm 付近の光出力パワーがおよそ -23 dBm 程度であることから、掃引中の実際の光出力パワーは、およそ 10 dBm 程度となることが推測できる。

本掃引光源を FBG センサモニタに応用する場合、図 2 に示すように掃引波長が正弦波的に変化しているため、掃引範囲の両端では波長が時間に対して直線的に変化していない。そのため、波長直線性が劣化し、FBG センサからの反射波長を求める精度が落ちる。そこで、本掃引光源を FBG センサモニタに応用する場合には、1492 nm と 1602 nm 付近の掃引が折り返されている波長領域の光は使用せず、1510 nm から 1590 nm の、波長が時間に対してほぼ直線的に掃引されている掃引幅 80 nm の出射光のみを利用する。

### 3.3 光出力パワーの評価

次に、この 1510 nm から 1590 nm までの波長範囲での光出力パワーの波長依存性を測定した。この測定では、本掃引光源を、後述する FBG センサモニタに組込んだ状態で測定し、本掃引光源からの出射光を FBG センサモニタの内部モニタで観測した。測定した結果を図 5 に示す。横軸は波長、縦軸は光出力パワーである。光出力パワーは、波長全域で 10 dBm 以上あり、最大値と最小値の差は 1.5 dB 程度であった。また、観測された掃引中の光出力パワーに不連続性が無いことから、掃引中の波長にモードホップが生じていないことが確認できる。光出力パワーに細かい揺らぎが見られるが、その振幅は 0.1 dB 程度であるため、本掃引光源は FBG センサモニタに十分応用可能であると判断できる。

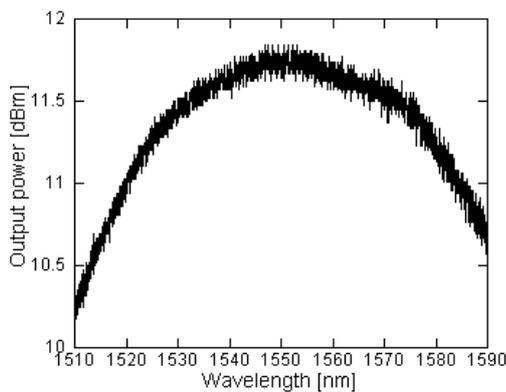


図 5 シングルモード波長掃引光源の光出力パワーの波長依存性  
Wavelength dependence of optical output power for single-mode WSLs.

従来型のマルチモード波長掃引光源と、今回開発した本掃引光源の、経過時間に対する光出力パワーの変動を図 6(a), (b) にそれぞれ示す。測定波長は、それぞれの波長掃引光源における掃引波長範囲の中心値とし、マルチモード波長掃引光源での観測波長は 1570 nm、今回開発した本掃引光源での観測波長は 1550 nm とした。横軸は経過時間、縦軸は光出力パワーである。測定時間は 1 分とした。マルチモード波長掃引光源の光出力パワー変動の標準偏差は 0.1 dB であるのに対し、本掃引光源の標準偏差は 0.03 dB であり、安定性が向上しているのが分かる。

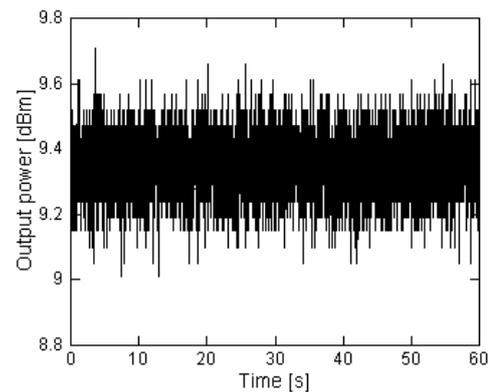


図 6(a) マルチモード波長掃引光源の 1570 nm での光出力パワー変動  
Output power fluctuation for multi-mode WSLs at 1570 nm.

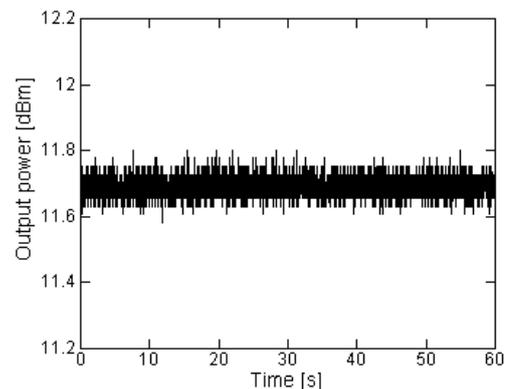


図 6(b) シングルモード波長掃引光源の 1550 nm での光出力パワー変動  
Output power fluctuation for single-mode WSLs at 1550 nm.

### 3.4 掃引中における発振スペクトル幅の評価

次に、本掃引光源の掃引中における発振スペクトル幅を測定した。測定系を図 7 に示す。本掃引光源からの出射光をファブリ・ペロー干渉計に入射し、受光器で電気信号に変換された透過プロファイルをオシロスコープで観測することにより、掃引中の発振スペクトル幅を見積もる方法を取った。実際の測定では、本掃引光源モ

ジュールからのトリガ信号をオシロスコープに入力し同期を取ること  
で、電気信号に変換されたファブリ・ペロー干渉計からの透過プロ  
ファイルを観測した。ファブリ・ペロー干渉計は、反射率 90%の平面  
ミラーを 2 枚用いて、フリースペクトラムレンジ 250 pm、フィネス 15  
となるように構成した。受光器の帯域は 50 MHz とした。

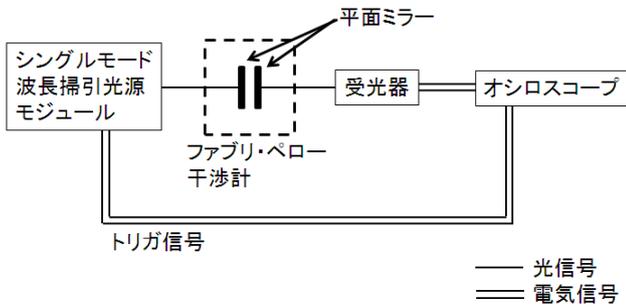


図 7 シングルモード波長掃引光源の発振スペクトル幅の測定系  
Measurement setup for spectrum width.

図 8 に、オシロスコープで観測した透過プロファイルを示す。横  
軸は時間、縦軸はファブリ・ペロー干渉計からの透過光パワーであ  
る。ファブリ・ペロー干渉計の本来の透過スペクトル幅は、そのフ  
リースペクトラムレンジとフィネスから、約 16.7 pm (=250 pm/15)と  
算出されるが、図 8 に示す通り、フリースペクトラムレンジとの比  
率から算出した透過スペクトル幅は、23.4 pm として観測された。観  
測されたスペクトル幅は、ファブリ・ペロー干渉計の本来の透過スペ  
クトル幅と、本掃引光源の発振スペクトル幅の和として観測される。  
従って、本掃引光源の掃引中の発振スペクトル幅は、約 6.7 pm  
(=23.4 pm - 16.7 pm)と見積もることができる。

以上の結果より、本掃引光源は光出力パワーの安定性に優れ、  
狭スペクトル幅であるため、FBG センサモニタへの応用にも適して  
いると判断できる。

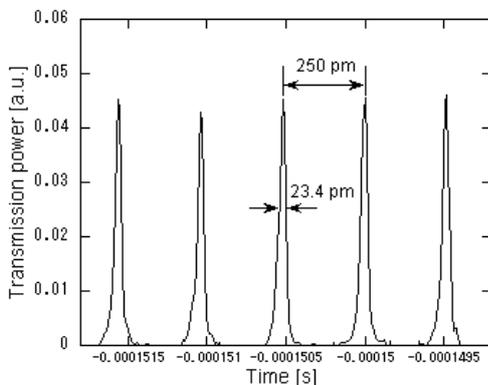


図 8 ファブリ・ペロー干渉計の透過プロファイル  
Transmission profile of fabry-perot interferometer.

## 4 FBG センサモニタの開発

### 4.1 FBG センサモニタの概要

本掃引光源を利用した FBG センサモニタを開発した。外観写真  
を図 9 に示す。図は、4 つの接続ポートに個別に FBG センサを接  
続し、それぞれのポート毎に独立した測定が可能な 4 ポートタイ  
プの装置 AR4041A であるが、1 つの接続ポートのみを備えた 1 ポ  
ートタイプの装置 AR4011A も同時に開発した。



図 9 開発した FBG センサモニタ AR4041A の外観写真  
Overview of FBG sensor monitor AR4041A.

本器は、以前に我々が開発した SF3041A/SF3011A と比較し、  
前述したように内蔵されている波長掃引光源モジュールの大きさが  
1/50 に小型化している。また、波長掃引光源の制御や測定データ  
の処理を行う信号処理回路部も大幅に小型化しており、結果的に  
本体体積比、質量比ともに、およそ 40%の小型化、軽量化を達成  
している。本器は、従来器同様、制御用パソコンを USB ケーブル  
で接続し、FBG センサを光出力ポートに接続することで、FBG セ  
ンサモニタシステムを構築できる。

本器の制御プログラム AR4042A も同時に開発した。本制御プロ  
グラムでは、反射スペクトラムや中心波長の観測とデータ保存、本  
器出射口から FBG センサまでのファイバ長の測定などを、制御用  
パソコンから容易に行うことができる。またサンプルとして、反射ス  
ペクトラムや中心波長データを表示、解析するプログラムや、掃引毎  
に取得した中心波長データを Fast Fourier Transform (FFT) 解  
析し表示するプログラム、制御用パソコンのマッピングファイル領域  
にコマンドを送ることで AR4042A を操作するプログラムなども同時  
に開発した。これらサンプルプログラムは、プログラムソースを公開  
することで、FBG センサモニタをお客様既存のシステムへ組み込  
み易くすることを意図している。

### 4.2 FBG センサモニタの内部構成と測定原理

図 10 に、AR4041A の内部構成を示す。本器は、シングルモ  
ード波長掃引光源、光カプラ、光サーキュレータ、受光器、信号処理

回路等から構成される。波長掃引光源モジュールから出射された光は光カップラで4分岐され、光サーキュレータを通過した後、本器外部に設置されたFBGセンサに入射される。FBGセンサからの反射光は、再び光サーキュレータを通過し、受光器で電気信号に変換される。この電気信号は、ダイナミックレンジを向上させるために、対数アンプで増幅された後、アナログ-デジタル変換器(ADC)でサンプリングされてデジタル信号に変換され、信号処理回路に入力される。信号処理回路では、この電気信号に変換された反射スペクトラムから波長微分を算出し、その値が0となる波長を中心波長として求めている。この中心波長の決定方法は、反射スペクトラムのピーク位置を演算により検出するため高精度であり、Field-Programmable Gate Array(FPGA)によるデジタル処理も容易に行うことができる。本器は、毎秒1250回の波長掃引が可能であり、各掃引毎にFBGセンサからの反射スペクトラムのピーク位置と、波長掃引光源モジュール内部からの波長モニタリング信号を用いて中心波長を演算することにより、高速なセンシングを実現している。

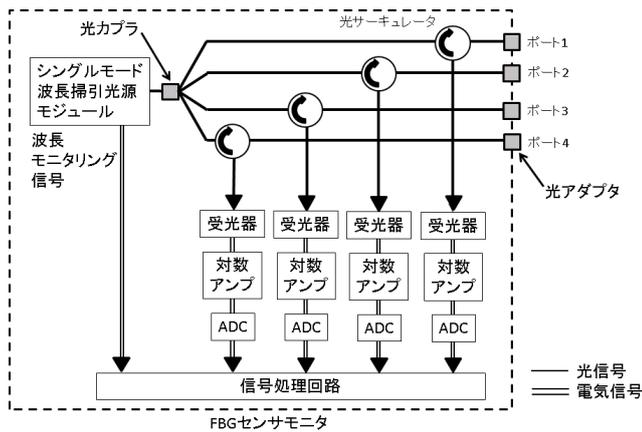


図10 FBGセンサモニタの内部構成  
Configuration diagram of FBG sensor monitor AR4041A.

AR4011Aでは波長掃引光源モジュールからの出射光を光カップラで分岐せずに光サーキュレータに入射するため、AR4041Aと比較し、光出力パワーが大きいことが特徴である。AR4011Aの光出力パワーは、本体仕様で+9 dBm ± 4 dBであるのに対し、AR4041Aでは+2 dBm ± 4 dBである。

### 4.3 FBGセンサの反射スペクトラムの評価

次に、本器の性能を評価した。本器は、内蔵したシングルモード波長掃引光源の発振スペクトル幅が狭いため、マルチモード波長掃引光源を内蔵した従来器に比べ、FBGセンサからの反射スペクトラムを高分解能に測定することが可能である。

まず、FBGセンサからの反射スペクトラムを本器で観測した。測定系を図11に示す。測定では10本のFBGセンサを直列に接続しており、その反射波長は5 nm置きにそれぞれ、1525 nm, 1530 nm, 1535 nm, 1540 nm, 1545 nm, 1550 nm, 1555 nm, 1560 nm, 1565 nm, 1570 nmとした。全てのFBGセンサを透過した光が光ファイバ端面で反射され、本器内部へ戻ることによるダイナミックレンジの劣化を防ぐため、光ファイバ端には光終端器を設けている。

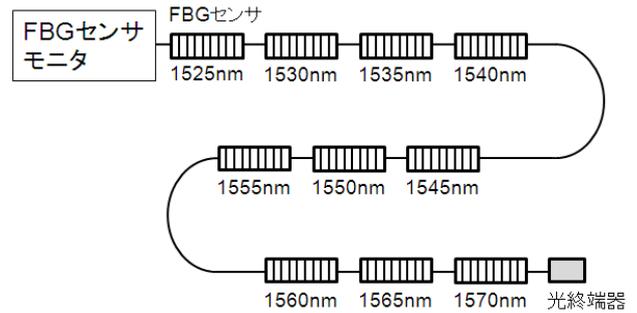


図11 FBGセンサからの反射スペクトラムの測定系  
Measurement setup for reflection spectrum of FBG sensors.

図12に、本器AR4011Aで測定した、FBGセンサからの反射スペクトラムを示す。10本のFBGセンサからのメインの反射スペクトラム以外にも、多数のサイドローブが観測されている。

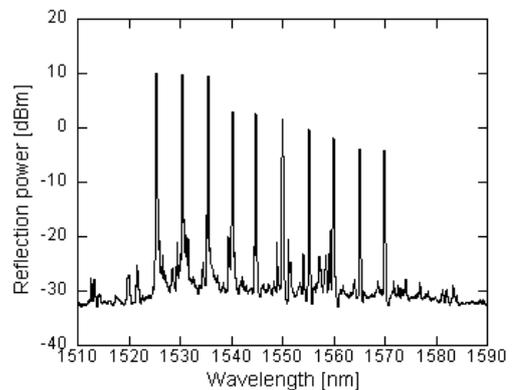


図12 FBGセンサからの反射スペクトラム  
Reflection spectrum of FBG sensors.

図13に、波長1525 nmのFBGセンサからの反射スペクトラムの拡大図を示す。図13(a)は、マルチモード波長掃引光源を使用した従来器SF3011Aで測定した結果であり、図13(b)は、シングルモード波長掃引光源を使用した本器AR4011Aで測定した結果である。図13(a)に示すように、従来器では、スペクトル幅は280 pmと観測された。また、1525.5 nm付近のサイドローブと共に、ピーク左右の中腹-20 dBm付近に、肩のような盛り上がりも観測

されている。これに対し、図 13(b)に示す本器による測定結果では、スペクトル幅は 220 pm と観測されており、従来器での観測結果より狭く観測されている。また、図 13(a)に見られる -20 dBm 付近の肩のような盛り上がり、ピークに近接したサイドローブであることが図 13(b)の結果から分かる。

前述したように、観測された FBG センサからの反射スペクトル幅は、FBG センサが持つ本来のスペクトル幅と、波長掃引光源の発振スペクトル幅の和として観測される。本稿 3.4 章で述べたように、本器に内蔵されている波長掃引光源の掃引中の発振スペクトル幅は 6.7 pm であることから、図 13(b)は、ほぼ本来の FBG センサからの反射スペクトラムの形状を表していると言える。更に、FBG センサの本来の反射スペクトル幅は 213 pm (=220-6.7 pm) であると言える。また、従来器に内蔵されているマルチモード波長掃引光源の掃引中の発振スペクトル幅は、約 67 pm (=280-213 pm) と見積もることができる。

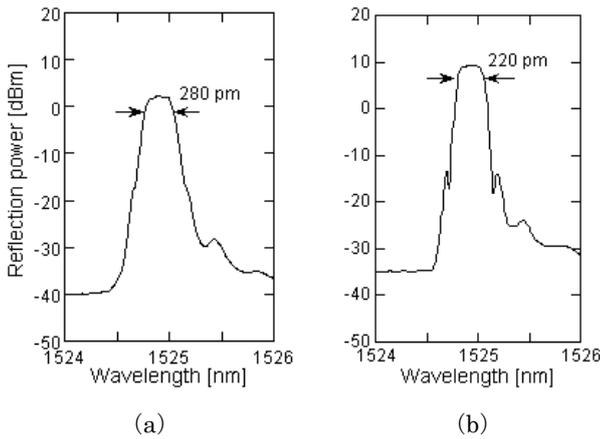


図 13 FBG センサからの反射スペクトラム  
Reflection spectrum of FBG sensor at 1525 nm.  
(a) 従来器での測定結果  
conventional FBG sensor monitor.  
(b) 本器での測定結果  
new FBG sensor monitor.

#### 4.4 波長測定精度の評価

次に、本器の波長測定精度を評価した。一例として、FBG センサを断熱材で被い、外気温の影響を受けない状態で、かつ、外力の掛からない状態に置き、本器で反射スペクトラムの中心波長を観測した。AR4011A を用いて反射波長 1550 nm の FBG センサを測定した結果を図 14 に示す。横軸は経過時間、縦軸は波長である。測定時間は 1 分とした。この状態で観測される中心波長の変動は、本器に原因のある変動であり、言い換えれば、本器の波長観測精度である。1 分間の中心波長変動の標準偏差はこの場合、

0.08 pm であった。従って、本器の波長測定精度(波長再現性)は 0.08 pm となる。これを一般的な FBG センサ(波長と歪みの換算係数 0.8  $\mu\epsilon/\text{pm}$ )を使用した場合の歪み測定精度に換算すると、0.064  $\mu\epsilon$  となる。従来器の歪み測定精度は 2~3  $\mu\epsilon$  であったため、一桁以上の精度向上を達成している。また、一般的な電気式の歪みセンサでも、その測定精度は 1  $\mu\epsilon$  程度であることから、電気式歪みセンサよりも一桁高精度に測定が可能である。

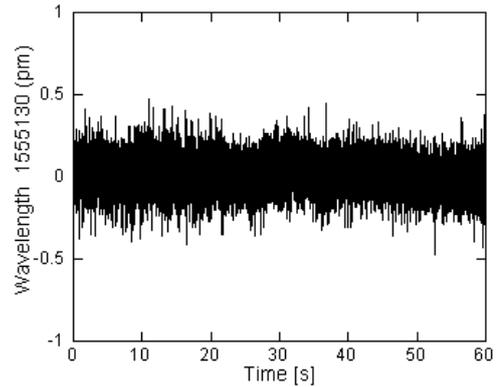


図 14 経過時間に対する FBG センサのピーク波長変動  
Wavelength fluctuation of center wavelength for FBG sensor at 1555 nm.

図 15 は、共振周波数 64 Hz の音叉の側面に反射波長 1545 nm の FBG センサを張り付け、その振動を観測した結果である。横軸は経過時間、縦軸は波長である。振動が減衰する様子を精細に観測できている。図には、経過時間 38 秒から 38.1 秒までの拡大図も併記している。振幅 0.5 pm 程度の微細な振動も観測できている。

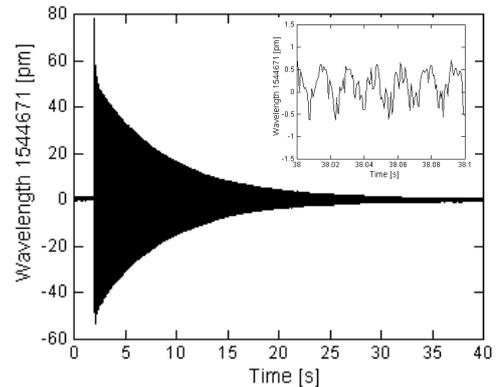


図 15 振動観測結果  
Result of vibration measurement at 1545 nm.

## 5 まとめ

掃引周波数 1.25 kHz、波長掃引範囲 110 nm のシングルモード波長掃引光源を利用した FBG センサモニタを開発し、その特性を評価した。

まず、本掃引光源の特性を評価し、光出力パワーの波長依存性が小さく、掃引中の発振スペクトル幅が狭いことを確認した後で、本掃引光源を利用したFBGセンサモニタAR4041A/AR4011Aを開発した。本器は、1510 nmから1590 nmの80 nmを1.25 kHzの高速性を保ちながら、高精度に測定することが可能であることを示した。一例として、FBGセンサからの反射スペクトラムを観測し、その測定精度が0.08 pmで観測できることを示した。本結果を、一般的なFBGセンサを用いた場合の歪み測定精度に換算すると、その測定精度は0.064 $\mu\epsilon$ であり、従来器や、電気式の歪み測定器より、一桁高精度に測定できることを明らかにした。

## 参考文献

- 1) 岩城英明, “FBGセンサによる建築構造ヘルスマニタリング”, 第47回光波センシング技術研究会, LST47-15, 2011.
- 2) 上明戸昇, 熊谷幸樹, 田村琢之, 塩谷智基, “FBG-BOTDR技術統合運用によるひずみ分布測定の実験的検証”, 第45回光波センシング技術研究会, LST45-5.
- 3) 出雲正樹, 松田和彦, “FBGを利用した光水位計システム”, 電子情報通信学会技術研究報告, 2005-02-25, 2005.
- 4) 菅井 栄一, 吉田 幸司, 青木 徹, 山賀 一徳, 遠藤 太嘉志, 西村好恵, “光ファイバセンサ(FBG)による法面監視システム”, 2002年土木学会年次学術講演会, pp.1431-1432, 2002.
- 5) 竹谷元, 尾崎毅志, “三菱電機におけるFBGセンサの製品応用”, 第37回光波センシング技術研究会, LST37-16, 2006.
- 6) K. Fujihashi, T. Aoki, K. Okutsu, K. Arai, T. Komori, H. Fujita, Y. Kurosawa, Y. Fujinawa, and K. Sasaki, “Development of Seafloor Seismic and Tsunami Observation System , ” Underwater Technology, pp. 349-355, 2007.
- 7) T. Saitoh, K. Nakamura, Y. Takahashi, and K. Miyagi, “High-speed MEMS swept-wavelength light source for FBG sensor system,” 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, Proceedings of SPIE Vol. 5855, pp.146-149, 2005.
- 8) T. Saitoh, K. Nakamura, Y. Takahashi, H. Iida, Y. Iki, and K. Miyagi, “Long-distance FBG sensor system using high-speed swept-wavelength light source,” in Proc. 18th International Conference on Optical Fiber Sensors (Cancun Mexico, October), ThE24 (2006).
- 9) T. Saitoh, "Optical spectrum analyzer and wavelength swept light source utilizing MEMS scanning mirrors," 7th Chitose International Forum on Photonics Science & Technology, 2006.
- 10) T. Saitoh, K. Nakamura, Y. Takahashi, H. Iida, Y. Iki, and K. Miyagi, “Ultra-Long-Distance Fiber Bragg Grating Sensor System,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 19, No. 20, pp. 1616-1618, Oct. 2007.
- 11) 高橋, 中村, 斉藤, 飯田:「高速FBGセンサモニタの開発」, アンリツテクニカル 84号, pp.28-33 (2007.3)
- 12) T. Saitoh, K. Nakamura, Y. Takahashi, H. Iida, Y. Iki, and K. Miyagi, “Ultra-long-distance (230 km) FBG sensor system,” in Proc. 19th International Conference on Optical Fiber Sensors (Perth Australia, April), 70046C (2008).
- 13) 斉藤崇記, “超長距離FBGセンサシステム”, 電気学会 光応用・視覚計測合同研究会, IM-08-1-1, 2008.
- 14) K. Nakamura, S. Morimoto, and T. Nakayama, “Single-Mode and Mode-Hop-Free Wavelength Sweep Light Source with Range of Over 160 nm and High Swept Frequency,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, No. 19, Oct. 2010.

## 執筆者



腰原 勝  
アンリツデバイス(株)  
センサ機器開発部



中村 賢一  
アンリツデバイス(株)  
センサ機器開発部



山崎 教明  
アンリツデバイス(株)  
センサ機器開発部



斉藤 崇記  
アンリツデバイス(株)  
センサ機器開発部



古川 浩  
アンリツデバイス(株)  
センサ機器開発部

公知