

高速波長掃引レーザを用いた FBG センサによる  
実時間振動計測システムに関する研究

平成 30 年 1 月

日本大学大学院 理工学研究科 博士後期課程  
電気工学専攻

山 口 達 也



# 目次

<b>第1章 緒言</b> .....	<b>1</b>
1.1 本研究の背景 .....	1
1.1.1 ファイバセンサの現状 .....	1
1.1.2 FBGの測定方法の現状 .....	2
1.2 本研究の目的 .....	4
1.3 本論文の構成 .....	5
1.4 本論文で用いる記号 .....	6
<b>第2章 波長掃引レーザを用いたFBGの反射波長測定の基本構成</b> .....	<b>7</b>
2.1 FBGの特性 .....	7
2.2 波長掃引レーザを用いたFBGの反射波長測定の原理 .....	9
2.3 重心法による測定時間の高分解能化 .....	11
2.4 まとめ .....	12
<b>第3章 リング共振器型波長掃引レーザを用いた実時間振動計測システム</b> .....	<b>13</b>
3.1 リング共振器型波長掃引レーザ .....	13
3.1.1 リング共振器型波長掃引レーザの構成 .....	13
3.1.2 リング共振器型波長掃引レーザの特性 .....	15
3.2 実時間計測システム .....	19
3.2.1 計測システムの構成 .....	19
3.2.2 アラートの発生処理 .....	21

3.2.3	計測システムのモニタ画面 .....	22
3.3	データ管理システム .....	23
3.3.1	データベースを用いたデータ管理システム .....	23
3.3.2	データ管理システムのユーザインターフェース .....	24
3.4	実験の結果と検討 .....	25
3.4.1	計測システムの波長換算 .....	25
3.4.2	FBG の反射信号の測定結果 .....	27
3.4.3	ひずみおよび振動測定の結果 .....	28
3.4.4	長時間の測定による瞬時ひずみの検出 .....	31
3.5	まとめ .....	35
<b>第 4 章 TC-FDML レーザを用いた FPGA による実時間振動計測システム</b> .....		<b>36</b>
4.1	TC-FDML レーザ .....	36
4.1.1	TC-FDML レーザの構成 .....	36
4.1.2	TC-FDML レーザの特性 .....	38
4.2	FPGA を導入した実時間計測システム .....	40
4.2.1	実時間計測システムの構成 .....	40
4.2.2	FPGA による実時間信号処理 .....	42
4.2.3	計測システムのモニタ画面 .....	44
4.3	FBG までのファイバ長の影響とその除去方法 .....	45
4.4	実験の結果と検討 .....	48

4.4.1 TC-FDML レーザの波長掃引特性.....	48
4.4.2 ファイバ長による影響と除去.....	50
4.4.3 高速振動測定の結果.....	57
4.4.4 長時間の測定結果.....	59
4.5 まとめ.....	62
<b>第5章 結言.....</b>	<b>63</b>
5.1 本研究で得られた成果.....	63
5.2 今後の展望.....	65
<b>謝辞.....</b>	<b>66</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>67</b>



# 第1章 緒言

## 1.1 本研究の背景

近年、橋梁、トンネルなどの社会基盤構造物の老朽化などによる災害あるいは地震や地滑りなどの自然災害への安全対策が重要な課題になっている<sup>[1-3]</sup>。また、航空機では、機械的なストレスによる損傷、あるいは燃費性能改善のための複合材料による軽量化にともない、稼働中の構造物を常時監視するモニタリングシステムが要求されている。航空機の飛行中や駐留中に発生する野鳥などとの衝突や地上の機材との衝突による構造物の損傷など危険な状態が引き起こされている。これらの状態を監視するため、衝撃応答を測定し、衝撃強度、位置などを推定するには高速な実時間モニタリングが必要とされている。そのため、構造物の健全度の把握を目的としたひずみの高速モニタリングシステムによる構造ヘルスマニタリングシステムの研究が行われている<sup>[4-6]</sup>。このような状況から、構造物の状態をモニタリングするためにひずみセンサの情報を高速に収集する実時間計測システムが求められる。

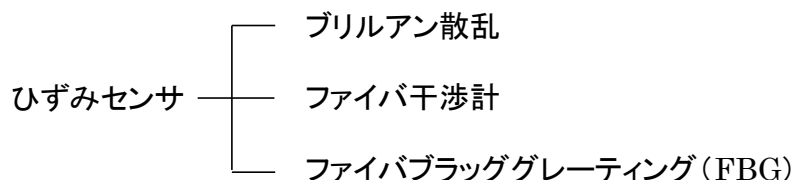
### 1.1.1 ファイバセンサの現状

ひずみセンサには電気方式、ファイバ方式などがあるが、特にファイバセンサは軽量かつ小型であり、無誘導性、防爆性に優れ、さらに、センサ部に電源を必要としない特徴があり、電気方式に対する優位性がある。

ファイバセンサにはブリルアン散乱を用いる方法、ファイバ干渉計を用いる方法、ファイバブラッググレーティング (fiber Bragg grating: FBG) を用いる方法がある (表 1. 1) <sup>[7-10]</sup>。ブリルアン散乱を用いる方法はファイバ中で発生するブリルアン散乱光の周波数がひずみに比例して変化する性質を利用している<sup>[7]</sup>。この方法はファイバ全長をセンサとして機能させることができるが、空間分解能および時間分解能が不十分となる問題がある。ファイバ干渉計を用いる方法はひずみや振動などによるファイバ長の変化を干渉光強度の変化として検出するため、高い時間分解能が得られるが、一般に、センサの多重化には、分光器あるいは光スイッチなどの光学部品が必要となるため多重化が容易でない<sup>[8]</sup>。一方、FBG を用いる方法はファイバのコアに回折格子を形成し、その反射波長 (ブラッグ波長) がひずみに比例する性質を利用する方法で、

ブラッグ波長の異なる FBG を使用できるため、センサとして多重化した測定が容易に行える<sup>9)</sup>。<sup>10)</sup>。さらに FBG を用いる方法は他の方式に比べて、ひずみに対する感度が高く、時間分解能を高くできる利点がある。

表 1. 1 ファイバを用いたひずみセンサの種類



### 1.1.2 FBG の測定方法の現状

FBG の測定方法には分光法、干渉法、波長掃引法など種々提案されている（表 1. 2）<sup>[11-21]</sup>。特に、FBG を用いて高速な振動を測定する方法として干渉法<sup>[12, 13]</sup>、レーザ復調法<sup>[15]</sup>、波長掃引法<sup>[17-21]</sup>などがある。

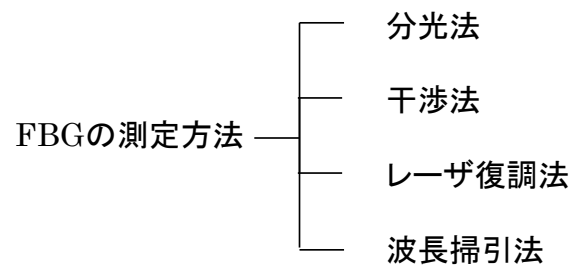
ここで、干渉法は FBG の反射光を不等光路型のマッハツェンダー干渉計に入射させ、FBG のブラッグ波長の変化を干渉光強度の変化として検出する。しかし、ブラッグ波長の変化分のみを検出しているため、ブラッグ波長の値の測定ができず、時間的に変化がゆるやかな静的なひずみを検出できない問題がある。また、レーザ復調法は FBG の反射スペクトルの勾配が急峻な波長域のレーザ光を入射させ、ブラッグ波長の変化を反射光強度の変化として検出する。しかし、レーザ復調法は FBG が静的ひずみを受けると、反射スペクトルがシフトするため、レーザ光の波長を常時、制御する必要がある。この課題に対して、光アンプを用いたファイバリングレーザが提案されている<sup>[16]</sup>。ファイバリングレーザは光アンプと FBG を用いてファイバリング共振器を構成する。しかし、FBG の多重化の際には多重化した FBG の個数分だけ、光アンプを必要とする問題がある。

これに対し、波長掃引法は波長掃引レーザ、単一の光検出器と多重化した FBG で構成される。この方法はレーザの発振波長を掃引させ、FBG で反射した光のブラッグ波長の変化を反射時間の変化として検出する。波長掃引法は波長掃引レーザの掃引周波数の高速化により、FBG の反射波長を高速に測定でき多重化が容易になる。しかし、FBG を多重化する場合には、FBG によ



る光の反射時間を複数回にわたり算出する必要があり、実時間測定には信号処理の高速化が必要となる。そのため、高速波長掃引を用いた長時間測定において、膨大なデータ管理を含めた実時間計測システムが必要であるが、これらに対する報告はほとんどない。また、Fourier domain mode locking (FDML) を用いた波長掃引レーザが提案され、波長掃引のさらなる高速化が可能になっている<sup>[22]</sup>。FDML レーザを用いた FBG の実時間計測システムはより一層の信号処理の高速化が求められているが、報告されていない状況である。

表 1. 2 FBG の測定方法の種類



## 1.2 本研究の目的

本研究の目的は構造物の常時モニタリングを行うため、高速波長掃引レーザと高速な信号処理システムを組み合わせ、FBGを用いた実時間振動計測システムを構築することである。そこで、以下の計測システムについて検討を行った。

(1) リング共振器型波長掃引レーザを用いた実時間振動計測システム

(2) 温度制御したFDMLレーザを用いたFPGAの信号処理による実時間振動計測システム

(1) ではリング共振器型波長掃引レーザ<sup>[23]</sup>を構築し、実時間振動計測システムの検討を行った<sup>[24, 25]</sup>。計測システムは汎用性の高いパーソナルコンピュータ(PC)を用い、信号処理をソフトウェア上で制御できるようにした。これにより、計測システムの拡張性・柔軟性を高めている。本研究ではデータベースを用いたデータ管理システムを組み合わせることにより、高速かつ長時間の連続測定を可能にした<sup>[26, 27]</sup>。さらに、ひずみにより発生するアラート機能を実装し、長時間の測定データより瞬時的なひずみを簡便に検出できることを示した。

(2) では実時間計測システムのさらなる高速化を図り、FBGを用いた高速な振動計測を実現するため、FDMLを用いた波長掃引レーザを導入した<sup>[22]</sup>。FDMLレーザは光が共振器内を周回する時間と波長フィルタの掃引周期を一致させ、より高速な波長掃引を実現できる<sup>[28-30]</sup>。本研究では、FDMLレーザの波長掃引の安定化を図るために、温度制御した Temperature-controlled FDML (TC-FDML) レーザを構築した<sup>[31-34]</sup>。波長掃引レーザを用いた計測には、一般的に波長掃引レーザの短波長から長波長方向の掃引(順掃引)のみが用いられている。本研究では、TC-FDMLレーザの順掃引と逆掃引の双方向を用い、TC-FDMLレーザの掃引周期の半周期ごとの測定を行った。また、波長掃引レーザを高速化した場合、計測システムからFBGまでのファイバ長による光の伝搬時間(遅延時間)が問題となる。そこで、波長掃引レーザの順掃引と逆掃引の双方向の掃引光を利用し、遅延時間を算出する方法を提案し、遅延時間の除去を行った。さらに、高速な実時間処理を実現するために、任意のデジタル演算を実装できる field programmable gate array (FPGA) を用いたハードウェア処理を導入した。これにより、本システムは高速な並列処理が可能になり、FBGを用いた高速かつ実時間の振動測定を実現した。

### 1.3 本論文の構成

次章以降の構成は以下の通りである。

#### 第2章 波長掃引レーザを用いたFBGの反射波長測定の基本構成

本章では、ファイバセンサであるFBGの特性について述べ、波長掃引レーザを用いたFBGセンサの反射波長測定の原理、さらに、重心法を用いた測定時間の高分解能化について述べる。

#### 第3章 リング共振器型波長掃引レーザを用いた実時間振動計測システム

本章では、構築したリング共振器型の波長掃引レーザの構成および光出力特性について述べる。つぎに、波長掃引レーザを用いたFBGによる実時間計測システムの構成およびひずみおよび振動測定の結果について述べる。さらに、データベースを用いたデータ管理システムの導入による高速かつ長時間の測定、アラート機能による長時間データから瞬時ひずみを検出する方法について述べる。

#### 第4章 TC-FDMLレーザを用いたFPGAによる実時間振動計測システム

本章では、TC-FDMLレーザの構成および光出力特性について述べる。つぎに、TC-FDMLレーザおよびFPGAによるハードウェア処理を組み合わせ、新たな実時間振動計測システムの構成について述べ、ファイバ長による遅延時間を算出する方法を提案し、FBGのファイバ長による影響の除去について述べる。そして、本システムによる多重化したFBGを用いた高速振動の測定について述べる。

#### 第5章 結言

最後に、本論文の総括を行い、今後の課題と展望について述べる。

## 1.4 本論文で用いる記号

主な記号は以下の通りである。

記号	用語
$\lambda_B$	FBG のブラッグ波長
$f_m$	波長掃引レーザの掃引周波数
$T_m$	波長掃引レーザの掃引周期 ( $=1/f_m$ )
$\Delta\lambda$	波長掃引レーザの掃引波長の帯域幅
$L_c$	波長掃引レーザの共振器長
$f_s$	AD コンバータのサンプリング周波数
$f_{\text{single}}$	単一限界周波数
$N_0$	反射信号のピーク位置のデータ番号
$N_{\text{CP}}$	反射信号の重心法によるピーク位置
$\Delta X$	可動ステージの移動量
$L_{\text{stage}}$	固定ステージと可動ステージの間隔
$\Delta\epsilon$	印加されるひずみ量 ( $=\Delta X/L_{\text{stage}}$ )
$\lambda_{\text{th}}$	アラート処理における反射波長のしきい値
$\sigma_{\text{th}}$	アラート処理における反射波長の標準偏差のしきい値
$V_D$	検出器出力
$\lambda_m$	計測システムにより測定される波長
$\lambda_{\text{WM}}$	波長モニタにより測定される波長
$t_{\text{cp}}$	反射信号の時間
$f_Q$	音叉の共振周波数
$\Delta L_D$	遅延ファイバの長さ
$t_r$	計測システムの時間分解能
$V_{\text{OSC}}$	発振器の信号電圧
$\tau$	FBG までのファイバ長による遅延時間
$f_v$	圧電振動子の振動周波数

## 第2章 波長掃引レーザを用いたFBGの反射波長測定の基本構成

本章では、波長掃引レーザを用いたFBGの反射波長測定の基本構成について述べる。まず、FBGの基本特性を述べ、波長掃引レーザを用いたFBGの反射波長測定の方法について述べる。つぎに、重心法を用いた測定時間の高分解能化による反射波長の高分解能化について述べる。

### 2.1 FBGの特性

FBGはファイバのコアに紫外光を照射し、コアの屈折率を周期的に変化させ、回折格子を形成している。そのため、(2.1)式を満たすブラッグ波長 $\lambda_B$ のみを反射する性質がある<sup>[10]</sup>。

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (2.1)$$

ただし、 $n$ はコアの屈折率、 $\Lambda$ は回折格子の間隔である。

図2.1に示すように、FBGに広帯域な波長の光を入射すると、ブラッグ波長の光が反射され、ブラッグ波長以外の光は透過する。ここで、ファイバの長さ方向にひずみ $\Delta\varepsilon$ を加えると、FBGのブラッグ波長は(2.2)式に表すように変化する<sup>[10]</sup>。

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left( \left\{ 1 - \left( \frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} - P_{12})] \right\} \Delta\varepsilon \right) \quad (2.2)$$

ただし、 $P_{11}$ 、 $P_{12}$ はポッケルス係数、 $\nu$ はポアソン比である。

また、ひずみに対するブラッグ波長の変化は、(2.3)式で表せる<sup>[10]</sup>。

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = 0.78 \times 10^{-6} [\mu\varepsilon^{-1}] \quad (2.3)$$

ここで、 $\lambda_B$ を1550 nmとしたとき、1000  $\mu\varepsilon$ のひずみに対してブラッグ波長は約1.2 nmシフトする。したがって、FBGの反射波長の変化量を測定することにより、ひずみセンサとして用いることができる。

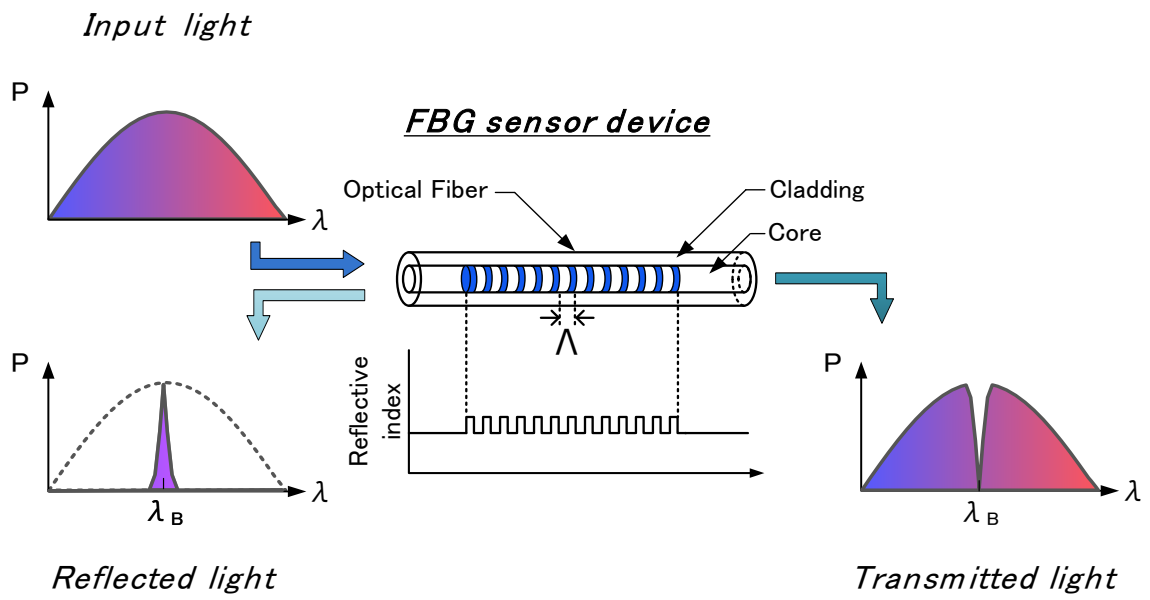


図 2. 1 FBG の特性

## 2.2 波長掃引レーザを用いた FBG の反射波長測定の方法

図 2. 2 に波長掃引レーザを用いた FBG の反射波長測定の基本構成を示す。構成は波長掃引レーザ、サーキュレータ、ひずみ測定用の FBG と検出器からなる。波長掃引レーザの掃引光はサーキュレータを介し FBG に入射され、FBG により反射したブラッグ波長の光は再びサーキュレータを介し検出器により反射信号として検出される。FBG の多重化は、異なるブラッグ波長  $\lambda_{Bk}$  ( $k=1\sim n$ ) の  $FBG_k$  ( $k=1\sim n$ ) を同一ファイバ上に配置して行う。

図 2. 3 に波長掃引レーザを用いた FBG の反射波長測定の方法を示す。波長掃引レーザの掃引周波数を  $f_m$  の三角波波形としたとき、掃引周期は  $T_m$  ( $=1/f_m$ ) となり、波長掃引は短波長から長波長方向の掃引（順掃引）と長波長から短波長方向の掃引（逆掃引）の区間からなる。このとき、FBG のブラッグ波長を  $\lambda_{Bk}$  ( $k=1\sim 3$ ) とすると、FBG の反射信号は FBG のブラッグ波長と波長掃引レーザの掃引波長が一致した時間に得られる。したがって、反射信号の時間は順掃引において  $t_{fk}$  ( $k=1\sim 3$ )、逆掃引において  $t_{bk}$  ( $k=1\sim 3$ ) となる。この反射信号の時間は FBG のブラッグ波長の値に依存して変化するため、得られた反射信号の時間を算出することで反射波長を算出することができる。

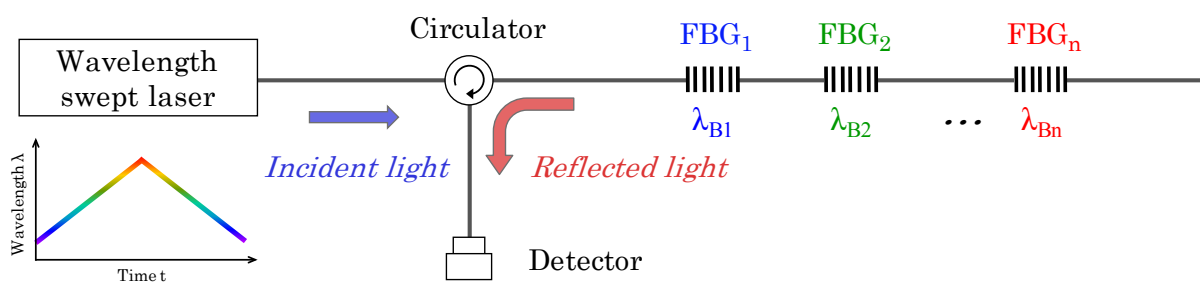


図 2. 2 波長掃引レーザを用いた FBG の反射波長測定の基本構成

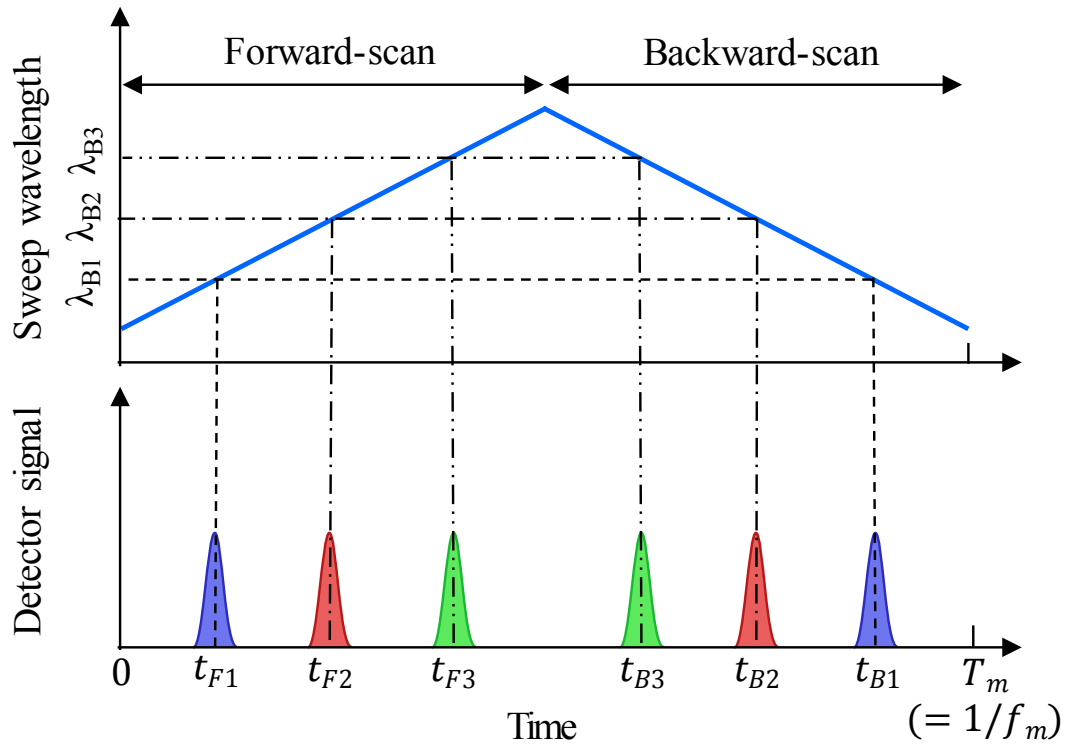


図 2. 3 波長掃引レーザを用いた FBG の反射波長測定



### 2.3 重心法による測定時間の高分解能化

前節のとおり，波長掃引レーザを用いて FBG の反射波長を測定するには，FBG の反射信号の時間を算出する必要がある。ここで，サンプリングされた FBG の反射信号の振幅値がピークとなったデータ番号  $N_0$  を用いた場合，ピーク位置検出の分解能が AD コンバータのサンプリング周波数  $f_s$  に依存する問題がある。そこで，本論文では重心法を用いたピーク位置検出を導入している。図 2. 4 に示すように，重心法はサンプリングされたデータのピーク値のデータ番号  $N_0$  とその周囲のデータを用いて重心位置  $N_{cp}$  を算出することにより，ピーク位置検出の高分解能化が行える。重心法による重心位置  $N_{cp}$  は (2. 4) 式より算出する<sup>[33]</sup>。

$$N_{cp} = \frac{\sum_{i=N_0-M_m}^{N_0+M_m} V_D(i) \times i}{\sum_{i=N_0-M_m}^{N_0+M_m} V_D(i)} \quad (2.4)$$

ただし， $M_m$  はピーク位置  $N_0$  の前後におけるおのおののデータ数， $i$  はデータ番号， $V_D(i)$  は検出器信号の振幅値である。

反射信号の時間  $t_{cp}$  はこの重心位置  $N_{cp}$  を用いて (2. 5) 式より算出する。

$$t_{cp} = N_{cp} \times t_s \quad (2.5)$$

ただし， $t_s (=1/f_s)$  は AD コンバータのサンプリング時間間隔である。

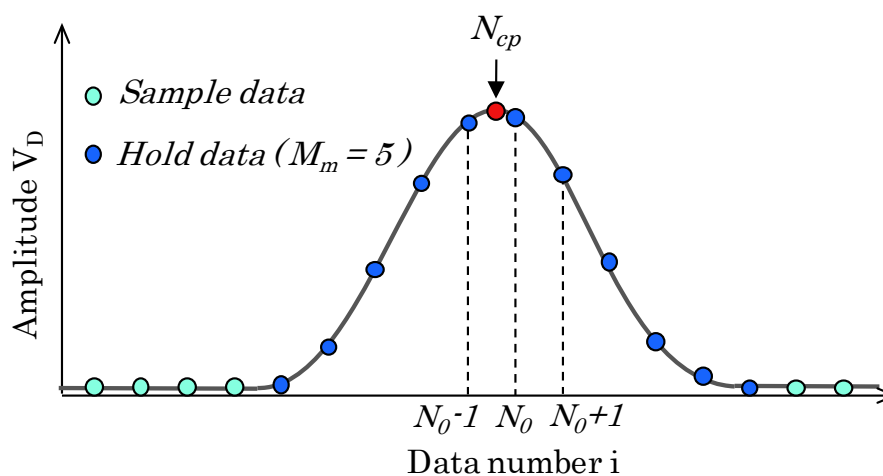


図 2. 4 重心法を用いたピーク位置検出

## 2.4 まとめ

本章の内容をまとめると以下のようなになる。

- (1) ファイバセンサである FBG の基本特性について述べ、ブラッグ波長の光のみを反射する性質を有すること、ブラッグ波長がひずみに比例して変化することから、FBG の反射波長を測定することにより、ひずみが測定できることを述べた。
- (2) 波長掃引レーザを用いた FBG の反射波長測定の基本構成について述べ、FBG の反射信号の時間から反射波長を算出する方法について述べた。さらに、FBG の反射波長の高分解能化を図るために、重心法を用いたピーク位置検出の方法を示した。

### 第3章 リング共振器型波長掃引レーザを用いた実時間振動計測システム

本章では、構築したリング共振器型波長掃引レーザを用いた実時間振動計測システムについて述べる。まず、リング共振器型波長掃引レーザの構成および光出力特性について述べる。つぎに、波長掃引レーザを用いた FBG による実時間振動計測システムの構成、ひずみおよび振動測定の結果について述べる。さらに、高速かつ長時間の測定に対応するため、データベースを用いたデータ管理システムを導入した。これにより、ひずみが発生したことを知らせるためのアラート機能を実装し、長時間の測定データより瞬時ひずみが印加された区間を検出できることを示した<sup>[27]</sup>。

#### 3.1 リング共振器型波長掃引レーザ

##### 3.1.1 リング共振器型波長掃引レーザの構成

図3.1はリング共振器型波長掃引レーザ (ring cavity typed wavelength-swept laser: SL) の構成である。SLは偏光無依存型の半導体光増幅器 SOA (SOA1013, Thorlabs), 波長可変光フィルタ OTF (FFM-C, AXSUN), 2つのアイソレータからなるリング共振器により構成される。SOAは両端面に無反射コートを施しており、波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯において広帯域な波長光を射出する。SOAの片端から射出した光はファイバを伝搬し、アイソレータ1, OTF, アイソレータ2を介し、再びSOAの他端に戻す。アイソレータ1, 2はリング共振器中の光の周回方向を一方向にしている。OTFはフリースペクトルレンジが 91.7 nm, 半値幅が 0.024 nm である。OTFは発振器 OSC (33612A, Agilent) の制御電圧により選択された波長光のみを透過する。透過光は共振器内を繰り返し周回することで、SOAにより増幅される。OTFを透過した光の一部はカップラにより、出力光として取り出す。波長の掃引はOTFに印加するOSCの制御電圧を掃引周波数  $f_m$  の三角波波形で駆動させて行った。

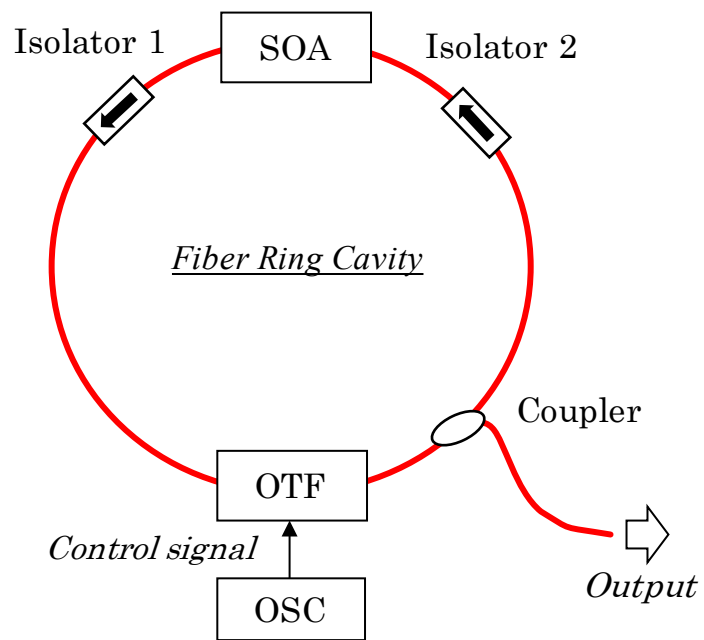


図 3. 1 リング共振器型波長掃引レーザ

### 3.1.2 リング共振器型波長掃引レーザの特性

まず、構築したリング共振器型波長掃引レーザ SL の掃引波長の帯域幅を光スペクトラムアナライザにより測定した。図 3. 2 (I)~(IV)はおおのこの掃引周波数  $f_m$  を 0.1 kHz, 1 kHz, 5 kHz, 20 kHz としたときの測定結果である。掃引波長の帯域幅  $\Delta\lambda$  は約 15 nm となっており、各掃引周波数において SL の波長の掃引が行えている。

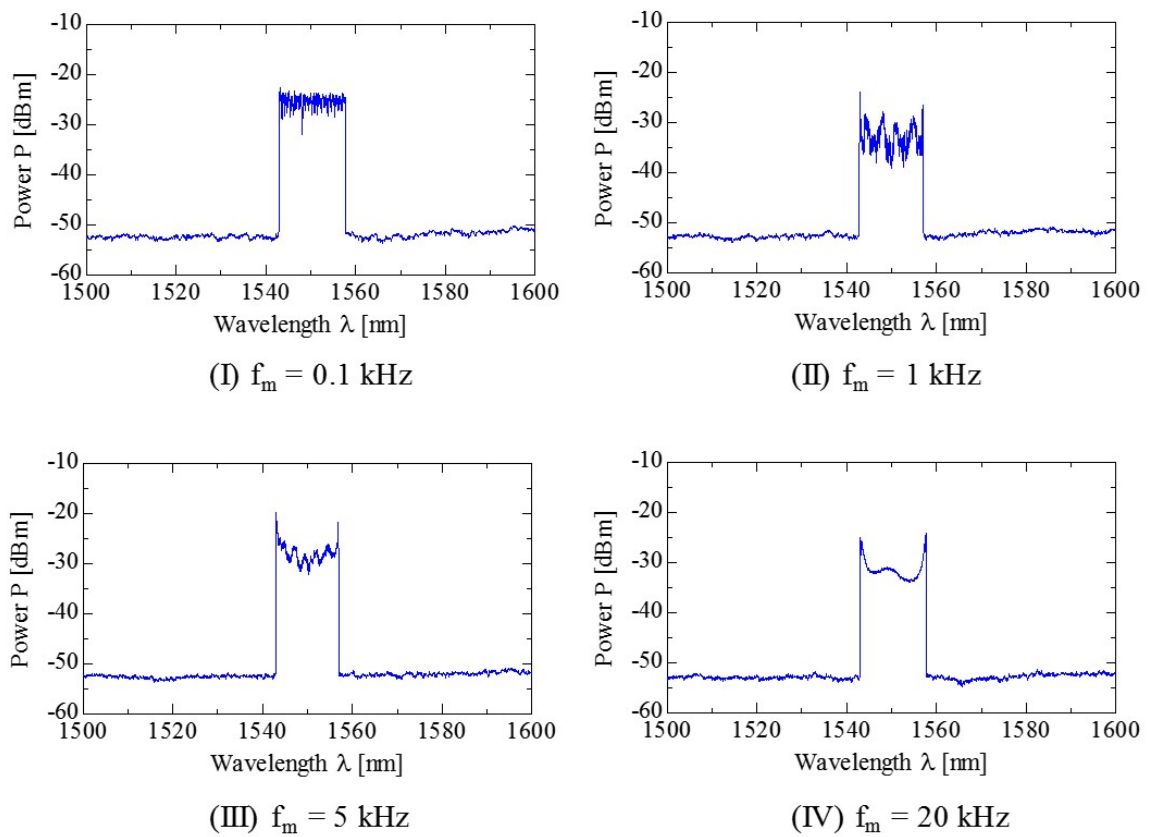


図 3. 2 リング共振器型波長掃引レーザの光スペクトルの結果

つぎに、SL の波長掃引光の時間波形を測定した。図 3. 3 (I)~(IV)は図 3. 2 (I)~(IV)の掃引周波数  $f_m$  において、2 周期分の時間波形を測定した結果であり、図(a)は OTF の制御信号電圧、図(b)は SL の光出力である。掃引周波数が高くなるにつれて SL の出力強度が徐々に低下しており、SL の光出力が掃引周波数に依存している。なお、光出力の位相が変化しているのは、波長可変光フィルタ OTF の周波数特性による影響である。

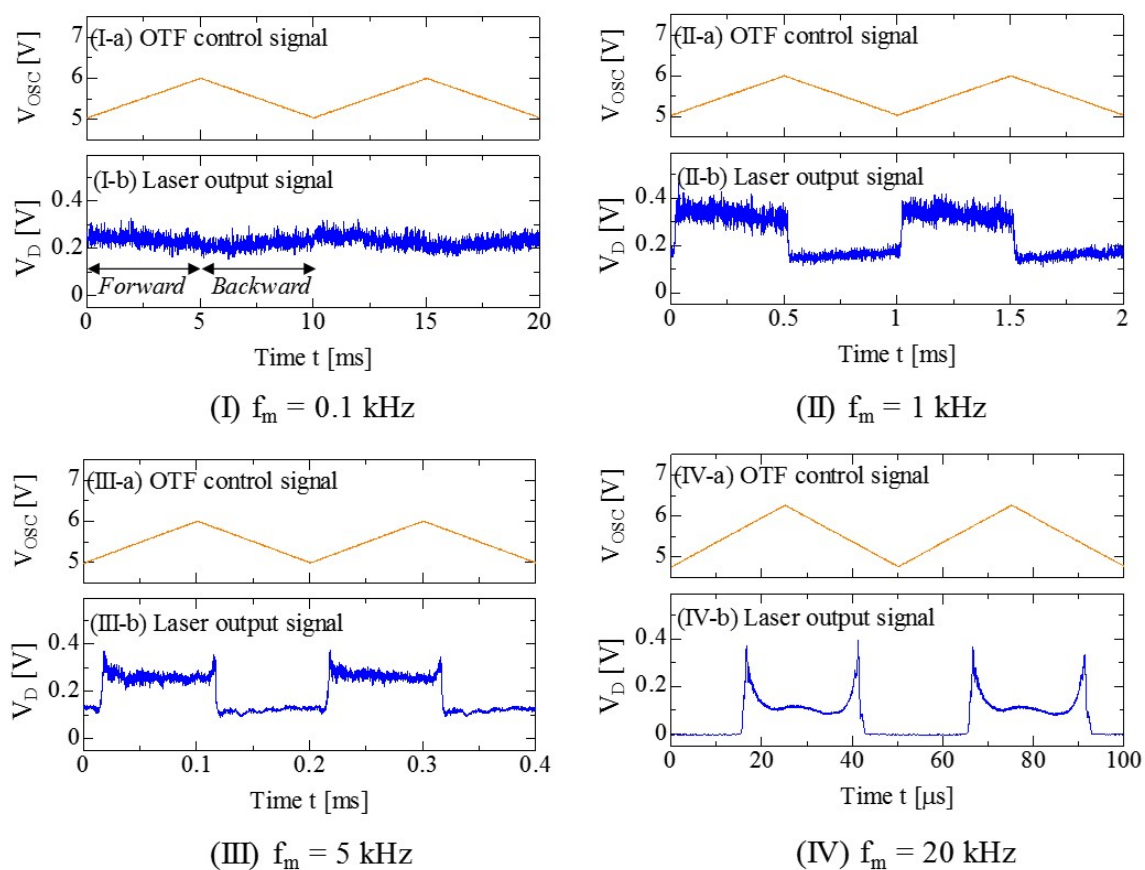


図 3. 3 リング共振器型波長掃引レーザの時間波形の結果

そこで、掃引周波数  $f_m$  による SL の出力強度特性を測定するため、SL の掃引周波数を可変し、出力強度を測定した。図 3. 4 は SL の掃引周波数による順掃引および逆掃引の出力強度の結果である。SL は順掃引と逆掃引ともに、出力強度が掃引周波数に依存して低下している。ここで、掃引周波数に対し出力強度が低下した原因として、単一限界周波数  $f_{\text{single}}$  の影響が考えられる。SL の掃引周波数が高速化した場合、OTF の透過光が共振器を周回している間に OTF の透過波長がシフトし、レーザ発振できなくなる。この単一限界周波数は OTF を透過した光が共振器を一周だけ周回することが可能な掃引周波数である。単一限界周波数は (3. 1) 式で表せる<sup>[23]</sup>。

$$f_{\text{single}} \approx \frac{\Delta\lambda_f \cdot c}{\Delta\lambda \cdot L_c \cdot n} \quad (3.1)$$

ただし、 $\Delta\lambda_f$  は光フィルタの透過波長帯域、 $c$  は光速、 $\Delta\lambda$  は波長掃引レーザの掃引波長の帯域幅、 $L_c$  は波長掃引レーザの共振器長、 $n$  はコアの屈折率である。

構築した SL における単一限界周波数の概算値は 32.9 kHz となった。図 3. 4 の破線は単一限界周波数を概算した結果を示している。

SL の順掃引の出力強度は掃引周波数の高速化にともなって、徐々に低下しており、単一限界周波数の近傍で急激に低下していることがわかる。なお、SL の逆掃引の出力強度はそれよりも低い掃引周波数において著しく低下している。これは逆掃引である長波長から短波長への掃引において SOA 内の非線形光学効果の影響のためと考えられる<sup>[23]</sup>。

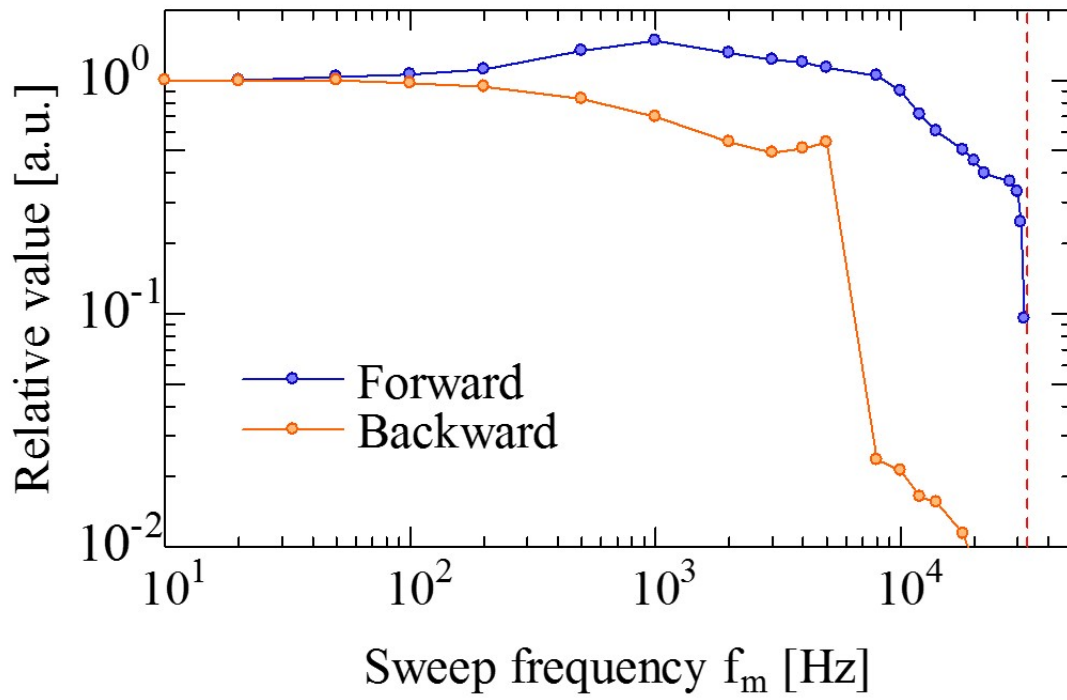


図3. 4 掃引周波数によるリング共振器型波長掃引レーザの光出力の結果



## 3.2 実時間計測システム

### 3.2.1 計測システムの構成

図 3. 5 に光学系と測定系からなる FBG の計測システムを示す。光学系はリング共振器型波長掃引レーザ SL, サーキュレータ, 3 つのひずみ測定用 FBG と検出器により構成している。SL が射出した光はファイバを伝搬し, サーキュレータを介し, ひずみ測定用の FBG に入射する。設置した  $FBG_k$  ( $k=1\sim 3$ ) のブラッグ波長  $\lambda_{Bk}$  ( $k=1\sim 3$ ) はおのおの 1545, 1550, 1555 nm, 反射率は約 4% である。FBG の半値幅は OTF の半値幅以上の約 0.1 nm にした。各 FBG で反射された光は再びサーキュレータを介し, 検出器に入射する。おのおのの FBG には固定ステージ  $FS_k$  ( $k=1\sim 3$ ) とステッピングモータを内蔵した可動ステージ  $MS_k$  ( $k=1\sim 3$ ) (SGSP-26-100, SIGMAKOKI) を設置し, その間隔  $L_{stage}$  はおのおの 1 m とした。ひずみはパルスステージコントローラ (SHOT-204MS, SIGMAKOKI) を用いて  $MS_k$  を  $\Delta X_k$  ( $k=1\sim 3$ ) 方向に移動させ, FBG を伸張させることで印加する。なお,  $MS_k$  を  $\Delta X_k \mu\text{m}$  移動したとき, ひずみ  $\Delta \epsilon_k$  ( $k=1\sim 3$ ) は  $\Delta X_k/L_{stage}$  となることから  $\Delta X_k \mu\epsilon$  に相当する。

測定系は, 汎用性の高いパーソナルコンピュータ (PC) を用い, デジタル入出力ボード (DIO) (PXIe-6341, National Instruments) と AD コンバータ (ADC) (PXI-5105, National Instruments) を搭載したデータ集録装置 (DAQ) (PXIe-1073, National Instruments) とデータベースにより構成している。DAQ には検出器の信号, OSC の制御信号に同期したトリガ信号とサンプリングクロック信号を入力した。DIO は OSC のトリガ信号を検出し, ADC のデータ集録の開始のタイミングを制御している。ADC は 12 bit の 8 つのアナログ入力チャンネルがあり, サンプリング周波数  $f_s$  を 40 MHz とした。DAQ から PC のデータ転送は PC 内の PCI-Express $\times$ 1 バスを介して行い, データの転送速度は最大 215 MByte/s である。FBG の反射信号の結果が転送されると, PC は FBG の反射波長の算出処理を行い, その結果はデータベースに転送される。データベースの構築はデータベース管理システムである SQLite を用いて行った。SQLite は他の管理システムに比べて, サーバを構築する必要がなく, 単一のファイルベースで動作することが特徴である。データのストレージにはデスクトップ型ネットワークストレージ (RN10400, Netgear) を

用いており、4つのHDドライブを内蔵し、8TByteの記憶容量を有している。また、PCからデータベースのデータ転送はLocal Area Network (LAN) を用いて行っている。

計測システムはSLの掃引周波数 $f_m$ を20kHzの順掃引を用いて、DAQのサンプリング周波数 $f_s$ を40MHzとし、多重化したFBGの反射波長 $\lambda_{mk}$  ( $k=1\sim 3$ )は測引周期 $T_m$  ( $=1/f_m$ )が50 $\mu$ sごとに測定する。なお、FBGの反射信号の検出には(2.4)式の重心法を用い、 $M_m$ の数を5とした。

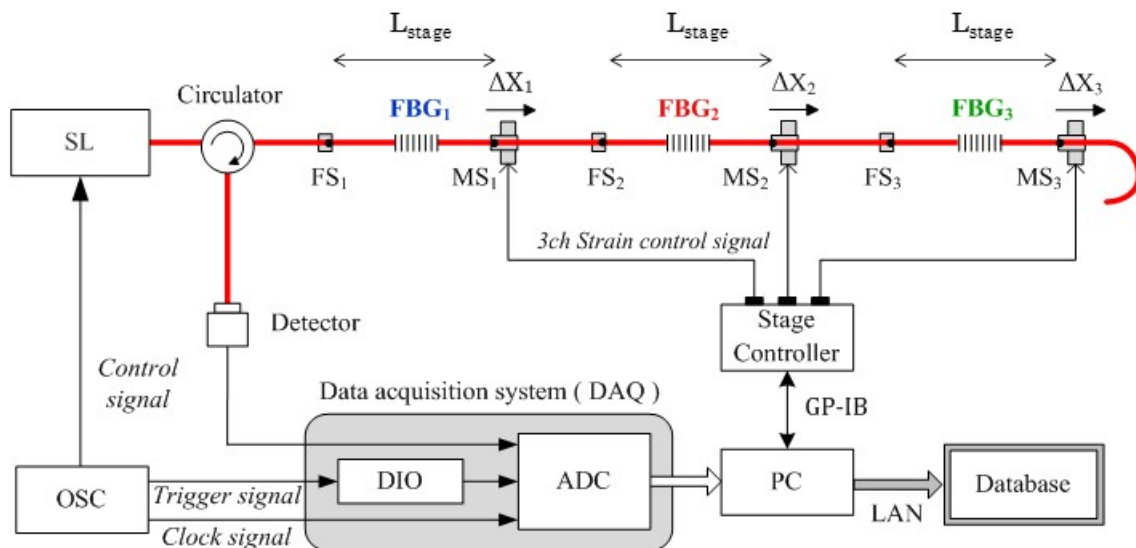


図3.5 計測システム

### 3.2.2 アラートの発生処理

高速かつ長時間の測定データから瞬時的なひずみが印加された区間を容易に抽出するため、計測システムにアラート発生の実装した。図 3. 6 にアラート発生の手信号処理のフローを示す。アラート 1 ( $A_1$ ) とアラート 2 ( $A_2$ ) の 2 つのアラートは 1 s 間の測定データ ( $N=1\sim 20000$ ) を用いて処理される。瞬時的なひずみによりアラートを発生させるため、 $A_1$  はおのこのの FBG の反射波長の値  $\lambda_{mk}$  ( $k=1\sim 3$ ) をしきい値  $\lambda_{th}^{(k)}$  ( $k=1\sim 3$ ) により判定し、 $A_2$  は各 FBG の反射波長の標準偏差の値  $\sigma_{mk}$  ( $k=1\sim 3$ ) をしきい値  $\sigma_{th}^{(k)}$  ( $k=1\sim 3$ ) により判定している。2 つのアラート処理により、 $A_1^{(k)}$ ,  $A_2^{(k)}$  ( $k=1\sim 3$ ) が 1 s ごとに発生する。計測システムはおのこの  $A_1^{(k)}$ ,  $A_2^{(k)}$  の論理和を取り、アラート信号  $A_1$ ,  $A_2$  を発生させており、いずれかの FBG でアラートが発生したことを検知できる。なお、アラートの発生処理のしきい値  $\lambda_{th}^{(k)}$ ,  $\sigma_{th}^{(k)}$  は設置した周囲環境などを考慮し、任意の値に設定できるようにした。

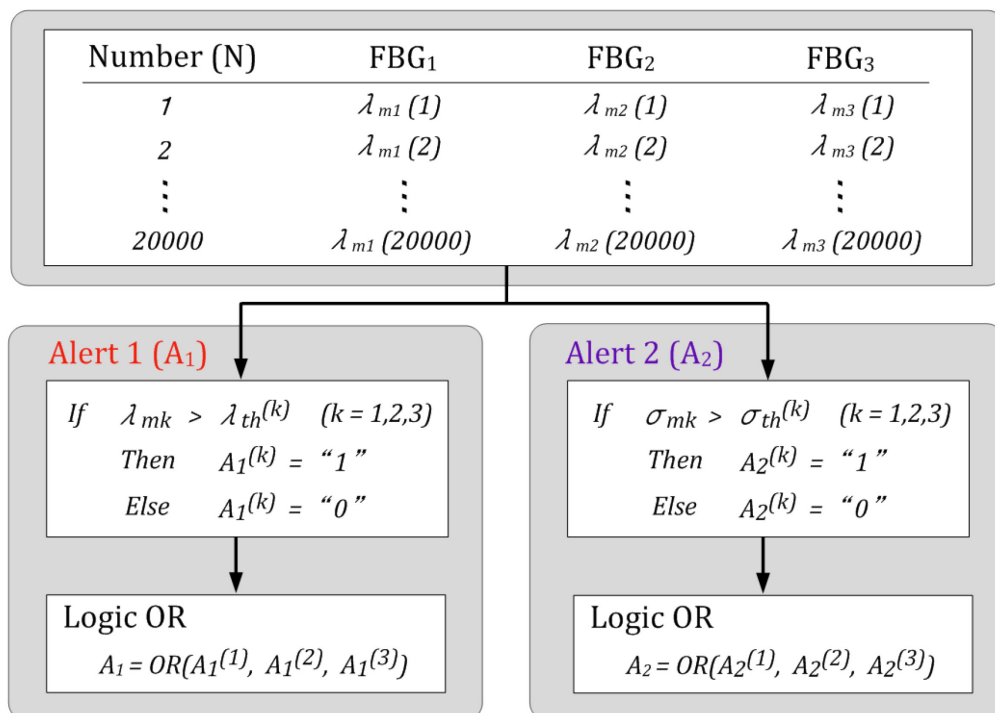


図 3. 6 アラート発生の手信号処理のフロー

### 3.2.3 計測システムのモニタ画面

計測システムは計測および制御アプリケーションの構築に用いられる開発環境 LabVIEW (National Instruments) を用いて開発した。図 3. 7 に計測システムのモニタ画面を示す。モニタ画面の左側は制御部であり、右側は測定データの表示部である。制御部では、DAQ や OSC などの測定系の動作状態やデータベースの接続状態の確認を行うことができる。表示部の上段では、各 FBG の反射波長の瞬時値  $\lambda_{mk}$ 、1 s 間の平均値  $\mu_{mk}$  ( $k=1\sim 3$ ) と標準偏差の値  $\sigma_{mk}$  を表示している。中段では、各 FBG の反射波長ならびにアラート  $A_1$ 、 $A_2$  の発生状況を表示している。下段では、ひずみにともない発生したアラートの時間情報のログが記録されている。このように複数の機能を、リアルタイム性を損なうことなく実行するため、計測システムは並列分散処理で実現している。このことにより、計測システムは複数の FBG の反射波長を高速に測定することができる。

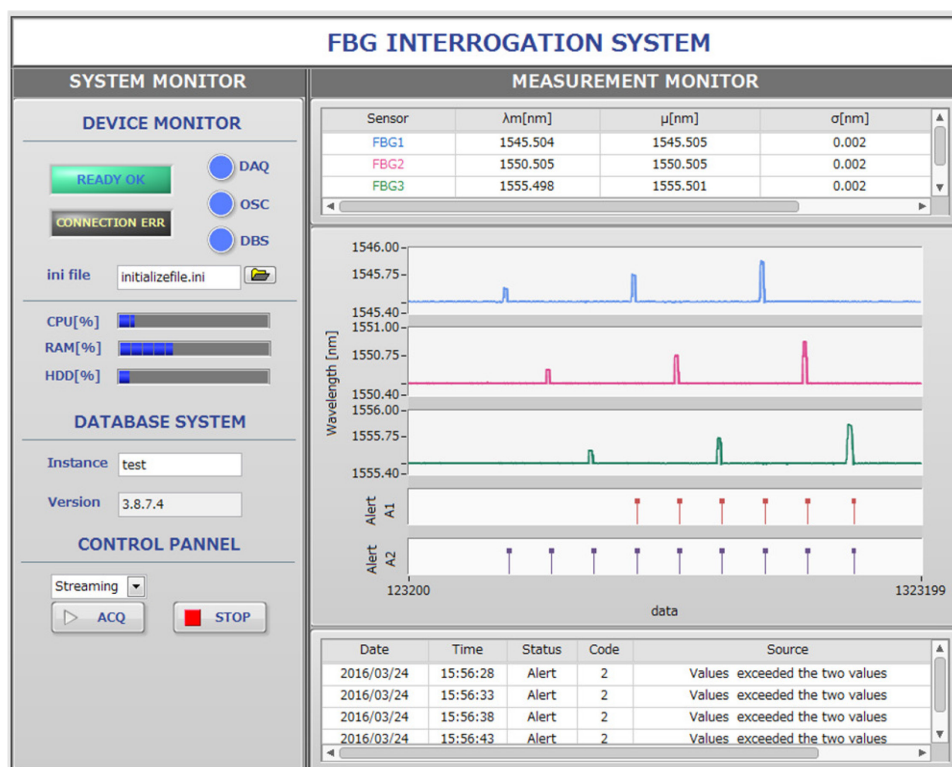


図 3. 7 計測システムのモニタ画面

### 3.3 データ管理システム

#### 3.3.1 データベースを用いたデータ管理システム

FBG の計測システムを用いた長時間の測定を実現するために、データベースを用いたデータ管理システムを構築した。図 3. 8 にデータベースを用いたデータ管理システムの概略を示す。FBG の反射信号は DAQ により取得し、PC のプロセッサにより処理する。プロセッサの出力は反射波長  $\lambda_{mk}$  ( $k=1\sim 3$ ) ならびにアラート  $A_1, A_2$  である。この出力結果がセンサデータとして順次データベースシステムに転送される。データベースシステムは SQLite を用いたデータベース管理システムにより、計測システムのセンサデータを管理している。このとき、計測システムからのセンサデータは 1 時間あたり約 2 GByte であり、高速かつ大量のデータがデータベースに転送されることになる。したがって、データベースを長時間にわたり連続稼働させるためには、データの格納速度を高速化する必要がある。そのため、データベースの格納には、複数のデータを一括して格納するバルクインサート処理を導入している。

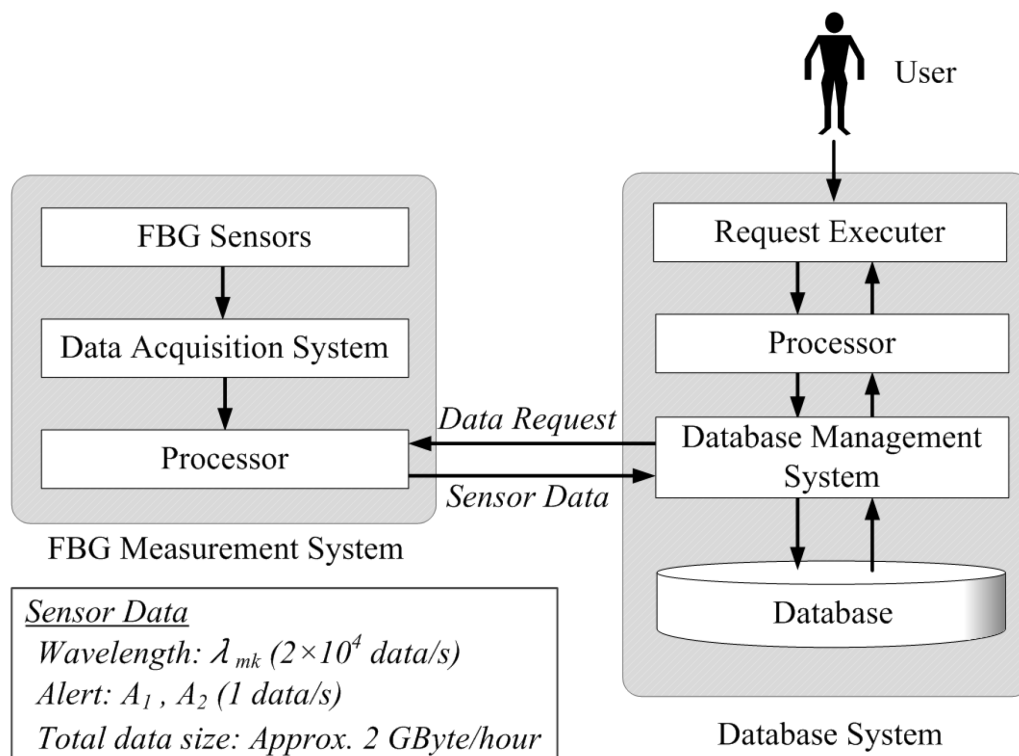


図 3. 8 データベースを用いたデータ管理システム

### 3.3.2 データ管理システムのユーザインターフェース

ユーザは図3.9のユーザインターフェース（UI）を介して、データベースシステムに接続することにより、高速かつ長時間のセンサデータから任意の区間を抽出することができる。UIは左側の制御部、右側の表示部からなる。表示部の上段はデータベースからアラート  $A_1$ ,  $A_2$  を取得し、時間単位で発生回数を表示している。さらに、中段では分単位に時間領域を拡大して発生回数を表示している。下段では、おのこの FBG の反射波長などの特性を表示している。ユーザはアラートが発生した時間を参照することにより、データベースからその時間における反射波長を取得できる。したがって、アラート機能を利用すると、長時間の測定データからひずみの発生状況を可視化することができるとともにその時間における反射波長をデータベースから容易に抽出できる。

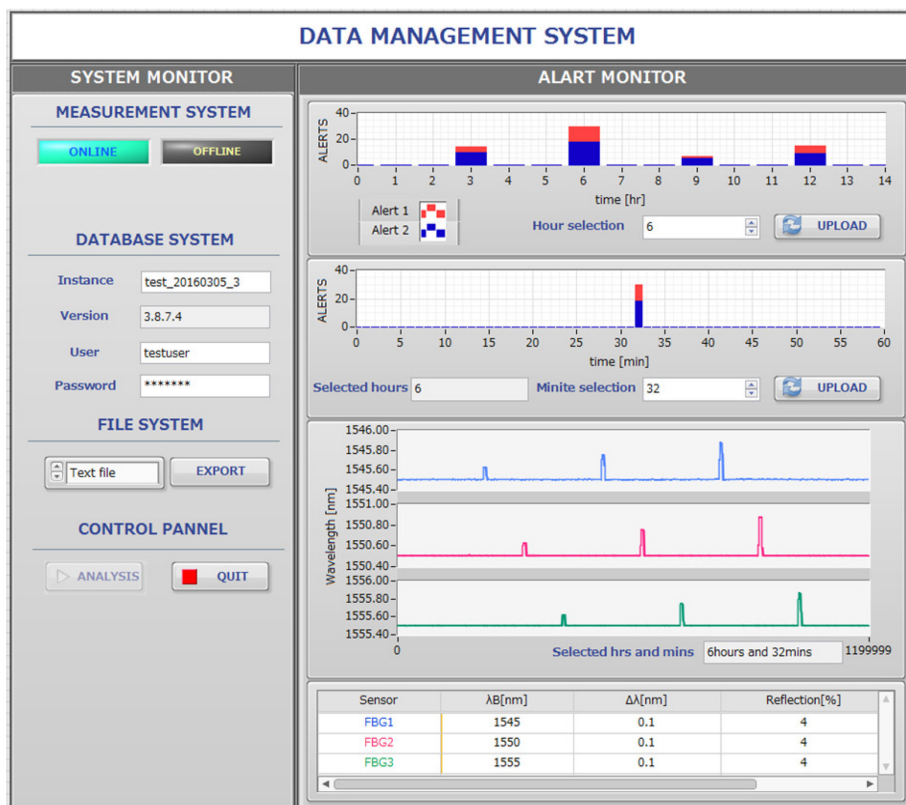


図3.9 データ管理システムのユーザインターフェース

### 3.4 実験の結果と検討

#### 3.4.1 計測システムの波長換算

反射信号の時間から反射波長を算出するには、反射信号の時間と反射波長の関係を測定し、換算式を算出する必要がある。そこで、図 3. 5 の計測システムにおいて図 3. 10 に示すようにカップラを介して検出器と同時に、波長モニタ WM (FB200, ANDO) により波長を測定した。WM は回折格子とフォトダイオードアレイを組み合わせた分光型で、波長分解能が 1 pm, 測定波長帯域が 1527~1567 nm である。図 3. 11 は測定した反射信号の時間  $t_{cp}$  と波長  $\lambda_{WM}$  の結果であり、この結果から 6 次の多項式近似により波長の換算式を算出した。計測システムは算出した換算式を組み込むことより、SL の順掃引区間を用いて FBG の反射波長を測定周期  $T_m$  ごとに算出している。

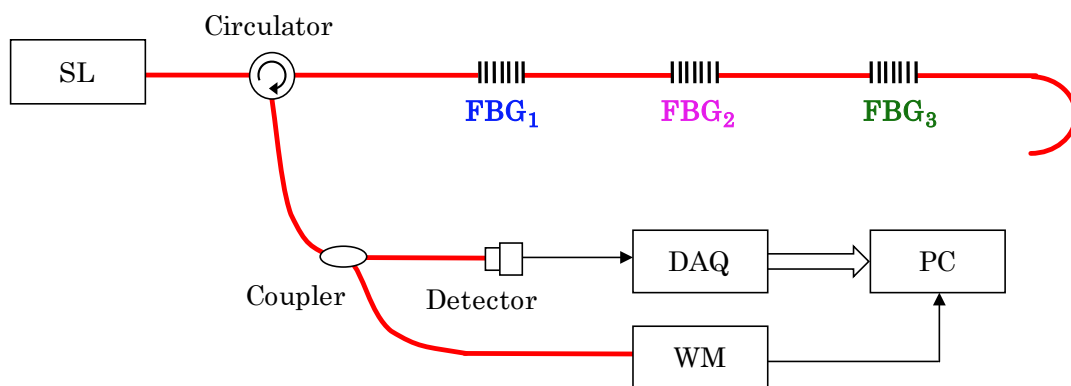


図 3. 10 計測システムの波長換算の実験構成

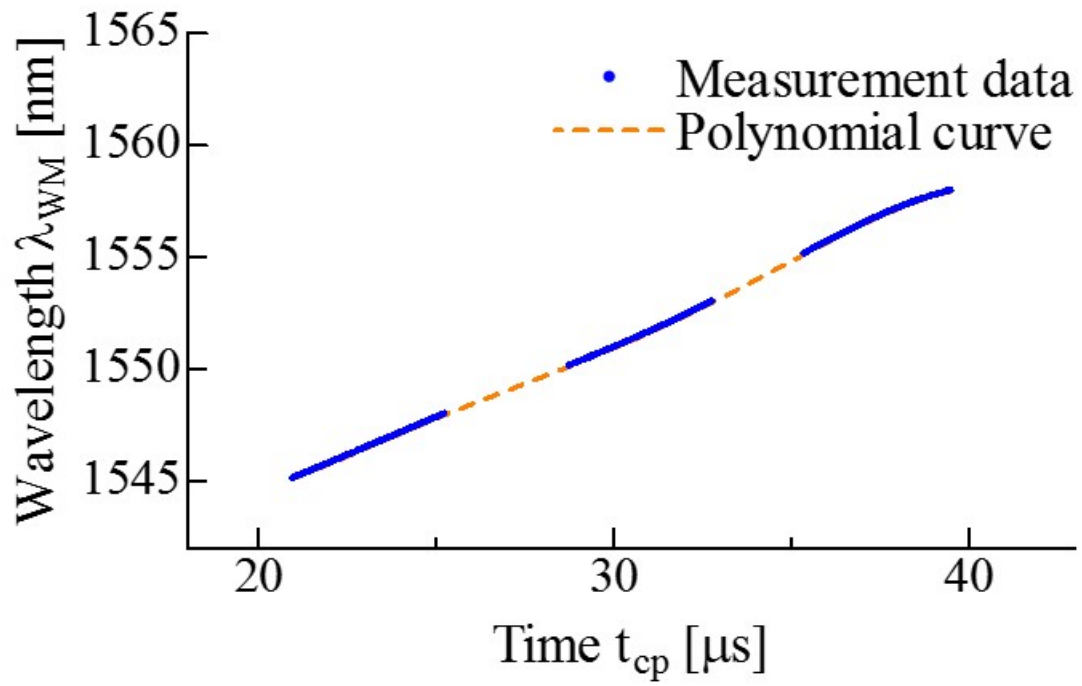


図 3. 1 1 反射信号の時間と反射波長の同時測定の結果



### 3.4.2 FBG の反射信号の測定結果

図3. 1 2は設置した3つのFBGの反射信号の結果である。反射波長の測定は前節の換算式により反射信号の時間から波長に換算することで行う。また、SLの掃引周波数を20 kHzとし、順掃引を用いることにより、測定周期が50  $\mu\text{s}$  となっている。本システムは反射信号の反射時間  $t_{\text{cp}}$  による換算式を用いて、各FBGの反射信号から反射波長  $\lambda_{\text{mk}}$  を算出する。

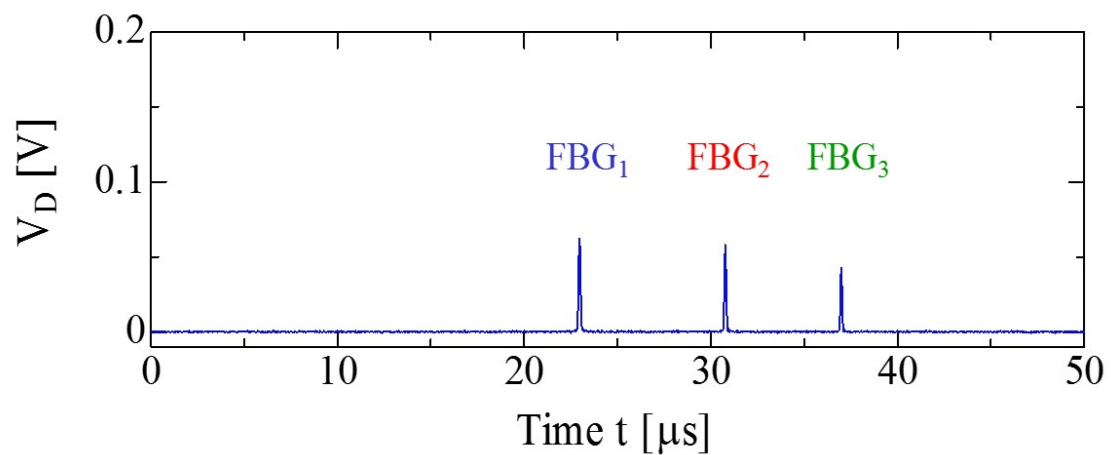


図3. 1 2 FBG の反射信号の結果

### 3.4.3 ひずみおよび振動測定の結果

FBG に静的なひずみを印加したときの反射波長を本システムにより測定した。ひずみ  $\Delta\epsilon_k$  は各 FBG に取り付けられた可動ステージ  $MS_k$  を  $\Delta X_k$  方向に  $100 \mu\text{m}$  ごと増加させて印加した。図 3. 1 3 は静的なひずみによる反射波長の結果である。おのおのの FBG はひずみの増加にともない、反射波長の値が長波長側に直線状にシフトしていることがわかる。したがって、FBG の反射波長の変化量を測定することによりひずみ測定が可能となる。また、本システムは 3 つの FBG を用いることにより、3 箇所のひずみ測定を同時に行うことができる。これらの結果より、反射波長の近似直線の傾きを最小 2 乗法により求めると、各 FBG において約  $1.2 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\text{m}$  となり、波長モニタ WM により測定した結果と一致した。

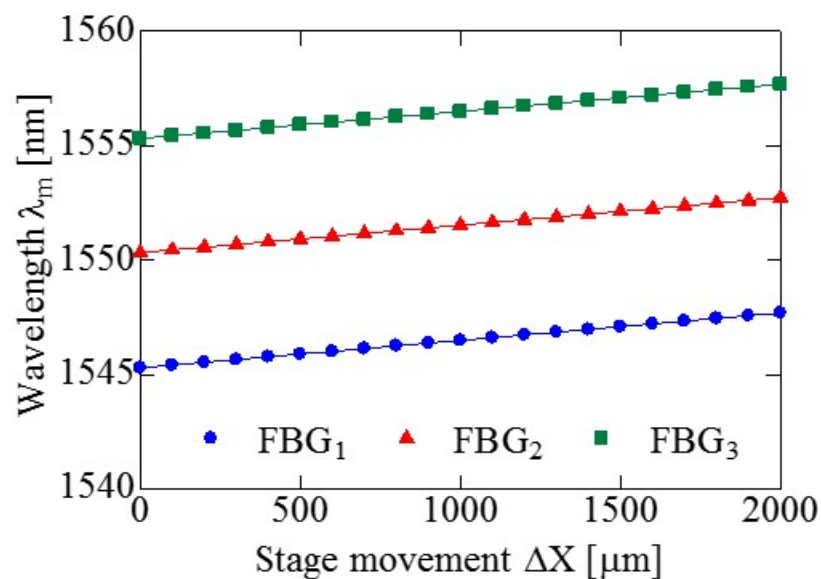
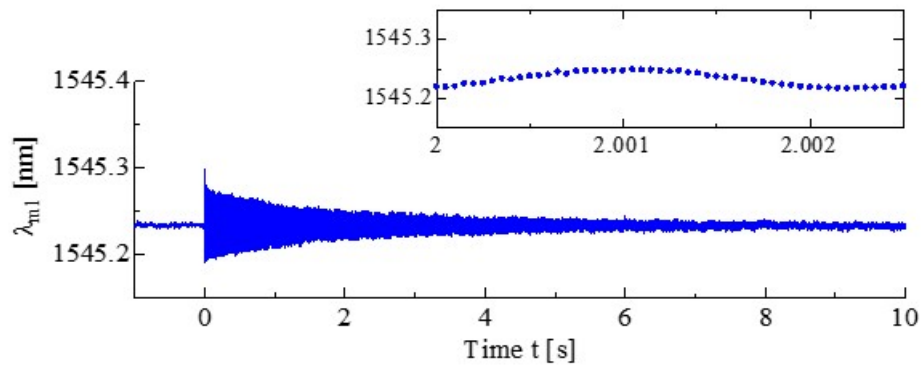
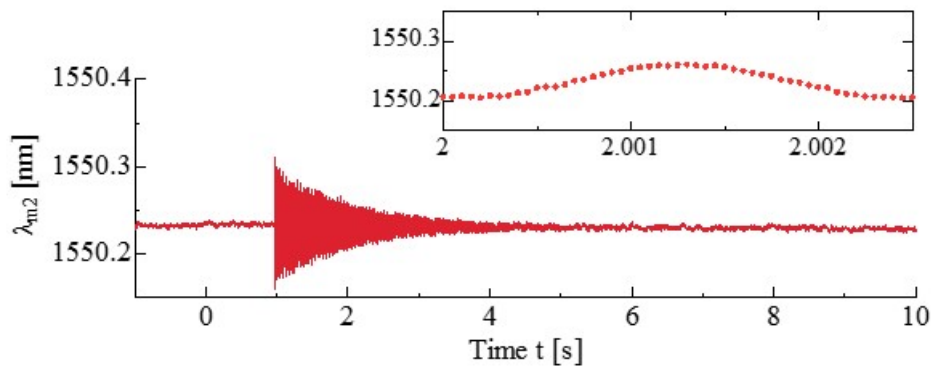


図 3. 1 3 静的ひずみの結果

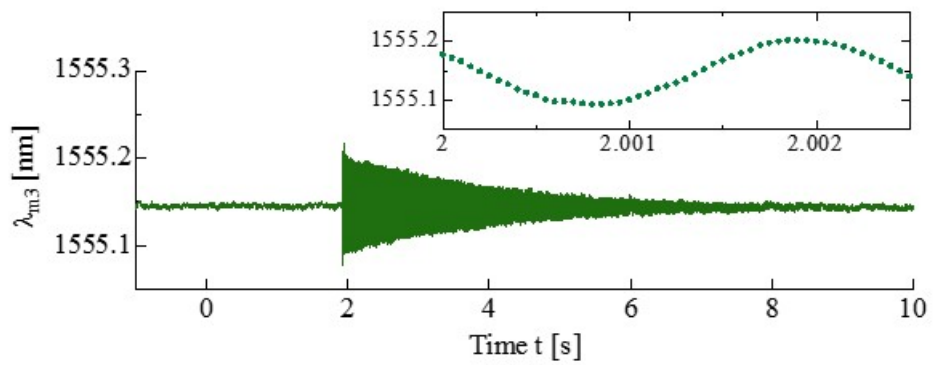
つぎに、本システムが振動を測定できることを実証するため、各 FBG を共振周波数の異なる音叉（共振周波数  $f_{Q1}=415$  Hz,  $f_{Q2}=440$  Hz,  $f_{Q3}=445$  Hz）の U 字部に固定し、FBG<sub>1</sub> に取り付けられた音叉から順次振動を印加した。図 3. 1 4 は音叉の振動による FBG の反射波長の測定結果であり、図 3. 1 4 (a), (b), (c) はそれぞれ FBG<sub>1</sub>, FBG<sub>2</sub>, FBG<sub>3</sub> の結果である。音叉を打音したことにより、各 FBG の反射波長の値は大きく振動し、徐々に減衰していることがわかる。また、図中の右上部には  $t=2\sim 2.0025$  s の時間領域を拡大した結果を表示している。音叉の振動による各 FBG の反射波長の変化が  $50\ \mu\text{s}$  の測定時間分解能で測定できている。FBG<sub>1</sub> の反射波長は正弦波状に振動しており、変化幅は約  $3\times 10^{-2}$  nm となっている。本システムの反射波長の標準偏差の値は  $2\times 10^{-3}$  nm 以下となっており、ひずみに換算すると、約  $2.4\ \mu\epsilon$  となる。このことから、本システムは  $2.4\ \mu\epsilon$  に相当するひずみの測定分解能を有している。



(a) FBG<sub>1</sub>



(b) FBG<sub>2</sub>



(c) FBG<sub>3</sub>

図 3. 1 4 振動測定の結果

### 3.4.4 長時間の測定による瞬時ひずみの検出

つぎに、本システムにおける長時間測定について検討した。測定時間は 14 時間連続とし、各 FBG には可動ステージ  $MS_k$  により、瞬時的なひずみを 3 時間ごとに印加した。測定開始から 3 時間、9 時間が経過したときに、 $MS_k$  の移動量  $\Delta X_k$  を 50, 100, 150, 200, 250  $\mu\text{m}$ 、時間幅  $T_p$  を 400 ms として順次パルス状に駆動した。また、測定開始から 6 時間、12 時間が経過したとき、 $MS_k$  の移動量  $\Delta X_k$  を 100, 200, 300  $\mu\text{m}$ 、時間幅  $T_p$  を 400 ms とし、各  $MS_k$  は 5 s ごとずらして駆動した。また、アラートを発生させるため、本実験ではアラート  $A_1$  のしきい値  $\lambda_{th}^{(k)}$  はおのおのの FBG の初期波長から 0.2 nm 増加した値に設定し、アラート  $A_2$  のしきい値  $\sigma_{th}^{(k)}$  は  $5 \times 10^{-3}$  nm に設定した。

データベースシステムの UI を介して、14 時間の連続測定の結果を取得した。図 3. 15 は連続測定によるアラート  $A_1$ ,  $A_2$  の結果である。おのおののアラートは FBG に瞬時的なひずみを印加した 3 時間ごとの区間のみにおいて発生しており、データベースシステムが 14 時間連続して正常に稼働していることがわかる。

つぎに、アラートが発生した時間情報から反射波長を抽出した。図 3. 16 はアラートが発生している 3 時間経過後である。図 3. 16 (a) はアラート  $A_1$ ,  $A_2$  の結果、(b), (c), (d) がそれぞれ  $FBG_1$ ,  $FBG_2$ ,  $FBG_3$  の反射波長の結果である。おのおのの FBG において、瞬時的なひずみによる反射波長の変化が測定できていることがわかる。また、反射波長が初期の値から 0.2 nm 以上変化している  $\Delta X_k = 200, 250 \mu\text{m}$  ( $t = 40, 50$  s) のひずみを印加した区間では、アラート  $A_1$  が発生している。一方、アラート  $A_2$  はひずみが印加された区間において発生している。おのおのの FBG の反射波長は同量のひずみに対し、同量の反射波長の変化として測定が行えていることがわかる。

図 3. 17 はアラートが発生している 6 時間経過後の反射波長を取得した結果である。FBG にひずみを印加する時間を 5 s ごとずらしているため、反射波長は  $FBG_1$  より順次変化していることがわかる。アラート  $A_1$ ,  $A_2$  はおのおのの FBG のアラート  $A_1^{(k)}$ ,  $A_2^{(k)}$  ( $k = 1 \sim 3$ ) の論理和により判定しているため、いずれかの FBG に印加された瞬時的ひずみが測定できていることがわかる。また、ひずみを印加していないとき、各 FBG の反射波長の値は図 3. 16 のときとほぼ同

じであり、長時間の測定ができていることがわかる。以上のことから、本システムは複数の FBG の反射波長を高速かつ長時間測定できるとともに、データベースシステムを用いてアラートの発生した時間情報から瞬時的なひずみによる反射波長を取得できることがわかる。

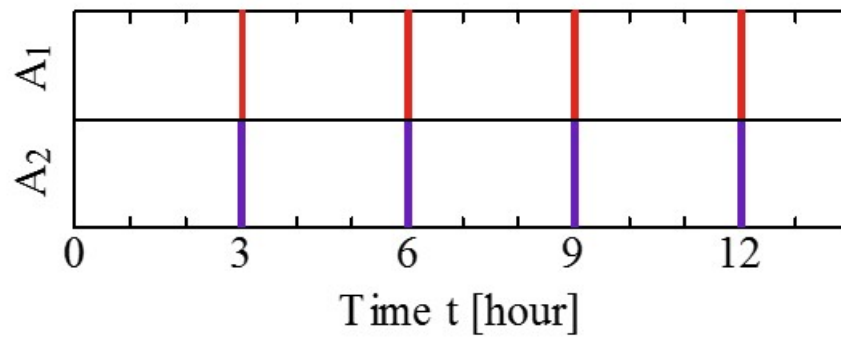


図3. 15 アラート A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>の14時間のモニタリング結果

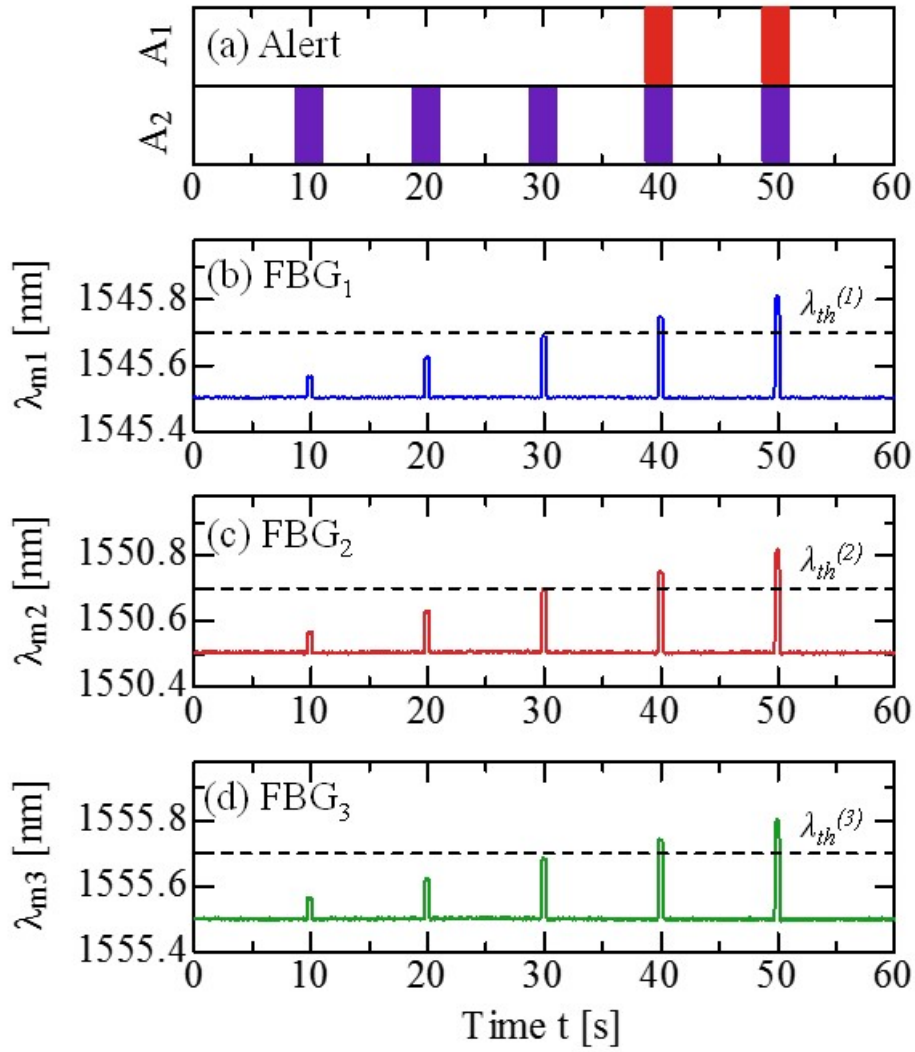


図3. 16 3時間経過後の測定結果

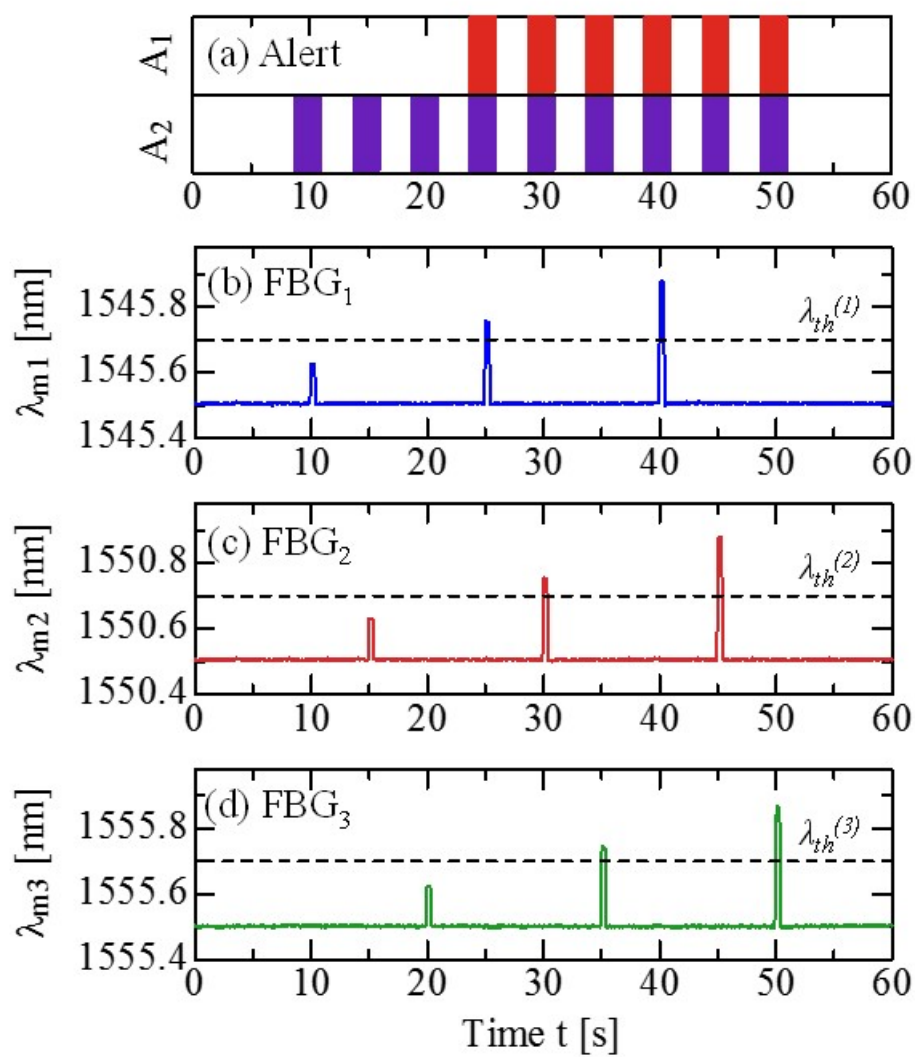


図3. 17 6時間経過後の測定結果



### 3.5 まとめ

本章の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 構築したリング共振器型波長掃引レーザは掃引波長の帯域幅が約 15 nm において掃引周波数を 20 kHz とした動作が行えることを示した。
- (2) リング共振器型波長掃引レーザによる FBG の実時間振動計測システムは PC を用い、ADC のサンプリング周波数を 40 MHz とした信号処理により、FBG の実時間測定が行える。
- (3) 本システムはリング共振器型波長掃引レーザの掃引周波数を 20 kHz で駆動し、複数の FBG の反射波長を時間分解能が 50  $\mu$ s において測定できる。振動測定では、数百 Hz の振動が測定でき、反射波長の標準偏差の値は  $2 \times 10^{-3}$  nm 以下であり、ひずみに換算すると、約 2.4  $\mu$  $\epsilon$  となることから、本システムは 2.4  $\mu$  $\epsilon$  に相当するひずみの測定分解能を有している。
- (4) データベースを用いたデータ管理システムを導入し、12 時間を超える FBG の高速な反射波長測定が行えることを示した。本システムは 2 種類のアラートの発生機能を実装し、おのおののアラートにより瞬時的なひずみが発生した区間を検出できる。

## 第4章 TC-FDML レーザを用いた FPGA による実時間振動計測システム

第3章では、リング共振器型波長掃引レーザを用いた実時間振動計測システムについて述べた。しかしながら、リング共振器型波長掃引レーザは掃引周波数を高速化した場合、単一限界周波数の影響により、出力強度が著しく低下する問題がある。この問題を解決するために波長フィルタの掃引周期とリング共振器内の光の周回時間を一致させた Fourier domain mode locking (FDML) を用いた<sup>[22]</sup>。

本章では、温度制御した FDML (TC-FDML) レーザを用いて実時間計測システムを構築した。波長掃引レーザの高速化にともなう信号処理は、FPGA を用いたハードウェア処理を導入した。つぎに、ファイバ長による光の伝搬時間を算出する方法を提案し、FBG のファイバ長による反射波長の算出への影響の除去を行った。さらに、本システムを用いて、FBG を用いた高速な振動測定と連続測定について検討した<sup>[33]</sup>。

### 4.1 TC-FDML レーザ

#### 4.1.1 TC-FDML レーザの構成

図4.1は波長1.55 $\mu\text{m}$ 帯で発振する温度制御したFDML (TC-FDML) レーザの構成である。TC-FDML レーザの光学系は温度制御された半導体光増幅器 (SOA)、2つのアイソレータ、ファイバ・ファブリーペロー・チューナブル・フィルタ (FFP-TF)、カップラ、サーキュレータと2kmのファイバからなるリング共振器により構成した。TC-FDML レーザは波長掃引の安定化を図るために、FFP-TFならびに2kmのファイバはおのこのペルチェ方式の恒温器1,2 (SLC-25A, Mitsubishi Electric Engineering) を用いて、温度を25 $^{\circ}\text{C}$ 一定に制御している。偏光無依存型のSOA (1117S, Thorlabs) の前後には2つのアイソレータを挿入し、光が共振器を周回するのを一方向にしている。FFP-TFは特定の波長の光のみを透過する光学波長フィルタであり、その透過波長は制御信号により任意に変換することができる。FFP-TF (Lambda Quest) は中心波長が1550 nm、フィネスが749、フリースペクトルレンジが119.2 nm、半値幅が0.16 nmである。FFP-TFの駆動系は発振器 (OSC) (33612A, Agilent Technologies) と高出力アンプ (AMP) (33502A, Agilent Technologies) により構成した。OSCはFFP-TFの駆動信号となる正弦波波形を発生させ、

AMP を介して FFP-TF を制御している。TC-FDML レーザの 2 km のファイバは共振器内を光が周回する時間を制御し、FFP-TF の掃引周期と一致させるためのものである。2 km のファイバを伝搬した光は、ファイバの片端に取り付けたファラデーローテータミラー (FRM) により反射され、サーキュレータを介してリング共振器に入射される。そのため、4 km のファイバを伝搬することにより、光の周回時間はおおよそ 19.6  $\mu\text{s}$  となる。光の周回時間と FFP-TF の掃引周期  $T_m$  ( $=1/f_m$ ) を一致させるには、掃引周波数  $f_m$  を 51 kHz 周辺で駆動させる必要があるため、TC-FDML レーザは掃引周波数  $f_m$  を 50.7 kHz とした。正弦波掃引により、短波長から長波長方向の掃引 (順掃引) と長波長から短波長方向の掃引 (逆掃引) の双方向の波長掃引を行う。

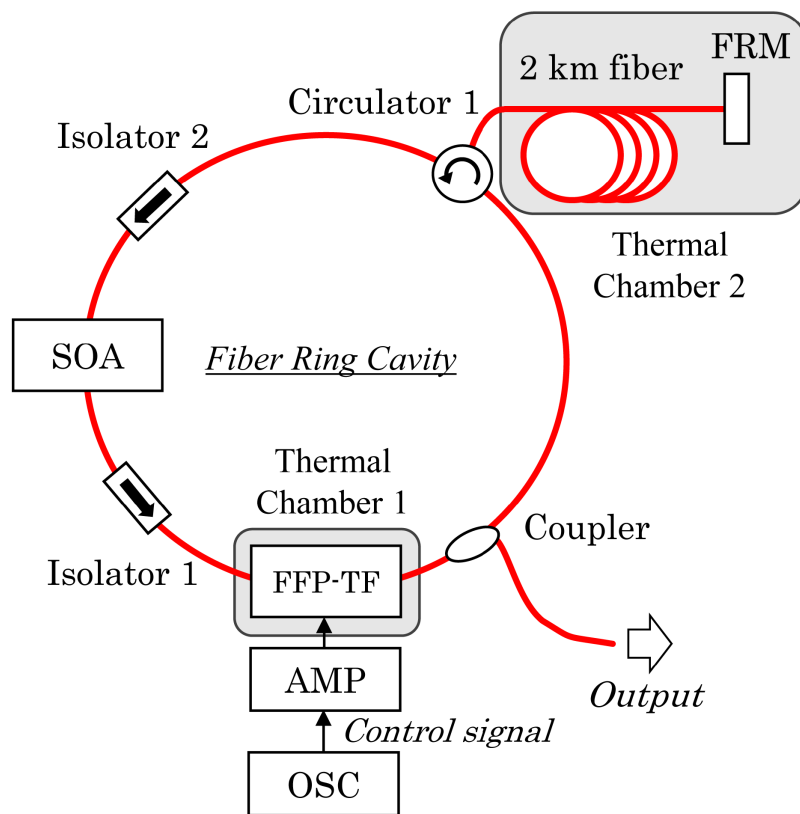


図 4. 1 TC-FDML レーザの構成

#### 4.1.2 TC-FDML レーザの特性

構築した TC-FDML レーザの波長掃引の特性を調べるため、光スペクトラムアナライザにより測定した。TC-FDML レーザは掃引周波数  $f_m$  を 50.7 kHz として駆動させている。図 4. 2 は TC-FDML レーザの掃引波長の帯域幅の測定結果である。TC-FDML レーザが発振波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯において 1520~1580nm の約 60 nm の波長掃引が行えていることがわかる。

つぎに、構築した TC-FDML レーザの光出力の時間波形を測定した。図 4. 3 に示すのが TC-FDML レーザの時間波形の結果である。TC-FDML レーザは順掃引と逆掃引の双方向の光出力が得られている。

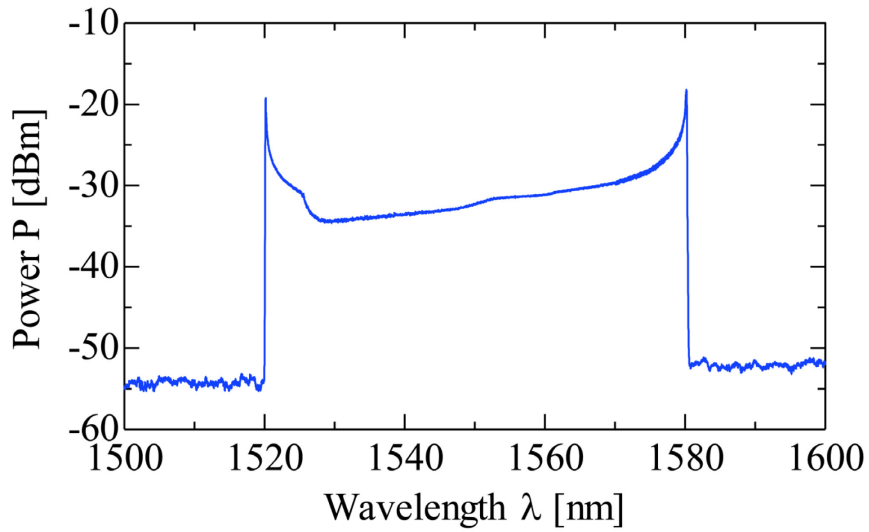


図4. 2 TC-FDML レーザの光スペクトルの結果

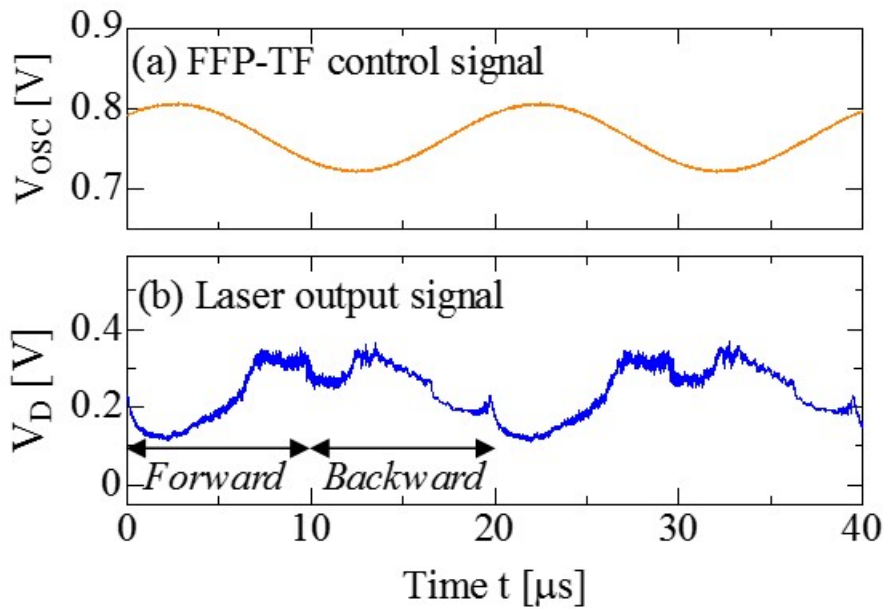


図4. 3 TC-FDML レーザの時間波形の結果

## 4.2 FPGA を導入した実時間計測システム

### 4.2.1 実時間計測システムの構成

図4. 4に TC-FDML レーザを用いた実時間計測システムの構成を示す。本システムは光学系と測定系により構成している。

光学系は TC-FDML レーザ，サーキュレータ，ひずみセンサである 5 つの FBG と検出器からなる。TC-FDML レーザからの出射光はサーキュレータを介して FBG に入射される。FBG<sub>k</sub> (k=1~5) のブラッグ波長  $\lambda_{Bk}$  (k=1~5) はおのおの 1530, 1540, 1550, 1560, 1565 nm であり，反射率は約 80 %，半値幅は約 0.2 nm である。おのおの FBG で反射された光は再び，サーキュレータを介して検出器に入射する。検出器の特性は周波数帯域幅が DC~300MHz であり，波長帯域幅は 1100~1700 nm である。FBG<sub>k</sub> (k=1~5) の設置位置は基準位置 P<sub>R</sub> からのファイバ長 L<sub>k</sub> (k=1~5) を 7.19, 12.43, 18.01, 23.52, 29.34 m とした。ここで，FBG<sub>1</sub> と FBG<sub>2</sub> の間には長さが  $\Delta L_D$  の遅延ファイバを挿入できるようにしており，そのとき，L<sub>2</sub>~L<sub>5</sub> は遅延ファイバの長さ  $\Delta L_D$  だけ増加する。なお，TC-FDML レーザから基準位置 P<sub>R</sub> までのファイバ長は L<sub>TR</sub>，基準位置 P<sub>R</sub> から検出器までのファイバ長は L<sub>RD</sub> とした。

測定系は FPGA を導入したデータ集録装置 (DAQ) ならびにパーソナルコンピュータ (PC) により構成されている。DAQ (PXIe-1071, National Instruments) は発振器 OSC の制御信号に同期したトリガ信号と 10 MHz の基準クロック信号を入力し，周波数同期している。この DAQ は ADC と FPGA が一体となったデジタイザとトランスミッタを搭載している。デジタイザ (PXIe-5170R, National Instruments) は分解能 14 bit の 4 つのアナログ入力チャンネルがあり，サンプリング周波数  $f_s$  を 250 MHz としたインラインの信号処理が可能となっている。信号処理された結果は転送帯域幅が最大 3.2 GByte/s のトランスミッタ (PXIe-8381, National Instruments) を介して PC に転送する。DAQ から PC のデータ転送は，転送速度の高速化を図るため，Direct Memory Access (DMA) 転送方式を用いている。

実験は TC-FDML レーザの掃引周波数  $f_m$  を 50.7 kHz で駆動させ、双方向の掃引光を用いて、各 FBG の反射光を測定する。本システムは各 FBG の反射波長  $\lambda_{mk}$  ( $k=1\sim 5$ ) を TC-FDML レーザの掃引周期  $T_m$  の半周期ごとに測定でき、その時間分解能  $t_r$  ( $=1/2f_m$ ) は 9.9  $\mu\text{s}$  である。

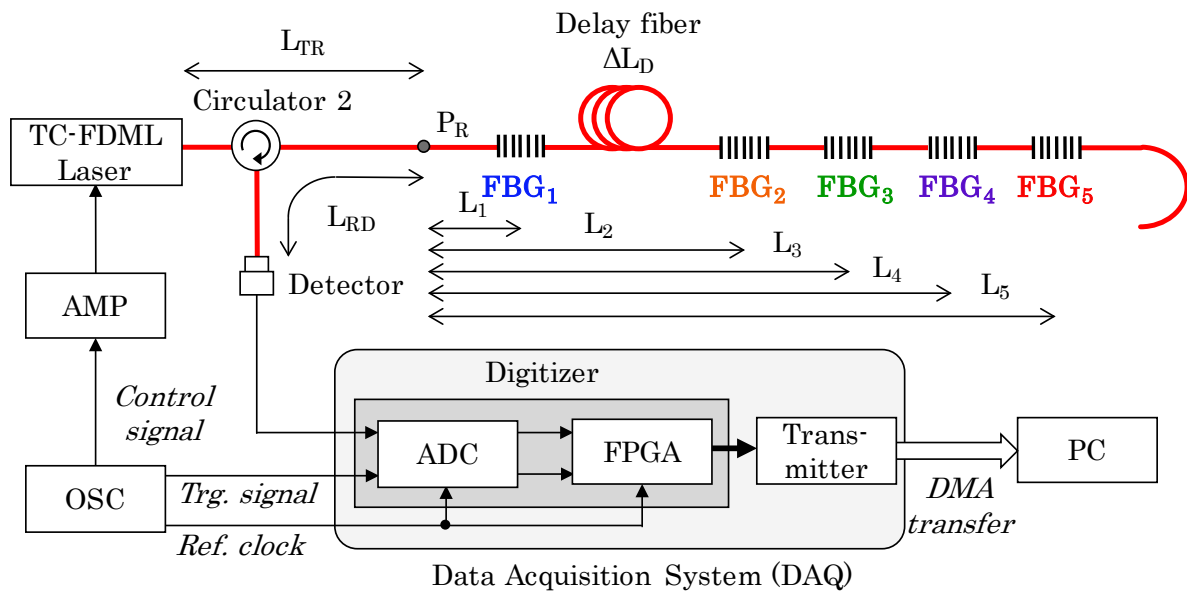


図 4. 4 TC-FDML レーザを用いた実時間計測システム

#### 4.2.2 FPGAによる実時間信号処理

FBGの反射信号の検出を高速化するため、FPGAを用いた信号処理を導入した。図4.5にFPGAを用いた信号処理のフローを示す。検出器の信号はトリガ信号によりADCを介して、FPGAに転送される。FPGAはしきい値処理により検出器の信号からFBGの反射信号を抽出する。そして、2.3節で述べた重心法を適用するため、抽出したFBGの反射信号は振幅がピークとなった位置のデータ番号 $N_0$ とその前後2点ずつ( $M_m=2$ )の計5データをホールドする。つぎに、(2.4)式の重心法により重心位置 $N_{cp}$ を算出する。実時間測定を行うためには、この一連の処理を順掃引と逆掃引において、FBGの反射信号ごとに行い、それをTC-FDMLレーザの掃引周期 $T_m(=1/f_m)$ 以内で出力する必要がある。そのため、FPGAはパイプライン処理を用いた並列処理の実装により信号処理を高速化した。FPGAにより算出された各FBGの反射信号の重心位置 $N_{cp}$ の結果はFPGA内のFIFOバッファに順番に入力し、PCへ転送する。この重心位置 $N_{cp}$ の結果を用い、反射信号の時間 $t_{cp}$ を(2.5)式により算出している。



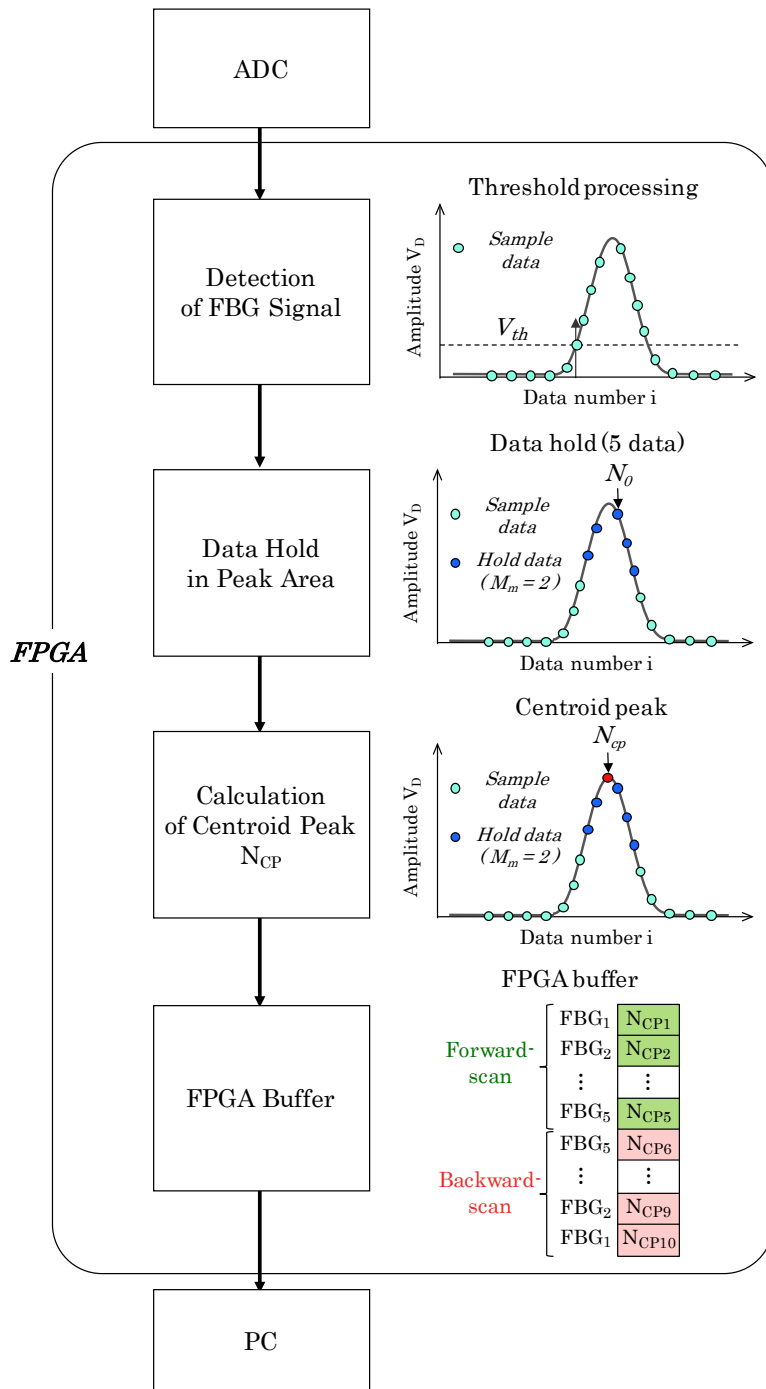


図4. 5 FPGAによる信号処理のフロー

### 4.2.3 計測システムのモニタ画面

計測システムはFPGAを搭載しているDAQを制御できるLabVIEWを用いて開発した。図4.6は計測システムのモニタリング画面である。モニタリング画面は制御部と表示部からなる。制御部はDAQやOSCなどの測定系の動作状態の確認やデータ集録の設定が行える。表示部は測定したおのおののFBGの反射波長を実時間で表示している。また、同時に測定した反射波長のデータはバイナリ形式のファイルに保存する。計測システムはこれら複数のタスクを効率よく実行させるため、並列分散処理を実装した。これにより、計測システムは複数のFBGの反射波長を実時間でモニタリングすることができる。同図は動的なひずみを印加したときの反射波長をモニタリングした表示であり、ひずみによりFBGの反射波長が変化していることがわかる。計測システムは複数のFBGの反射波長を実時間モニタリングできる。

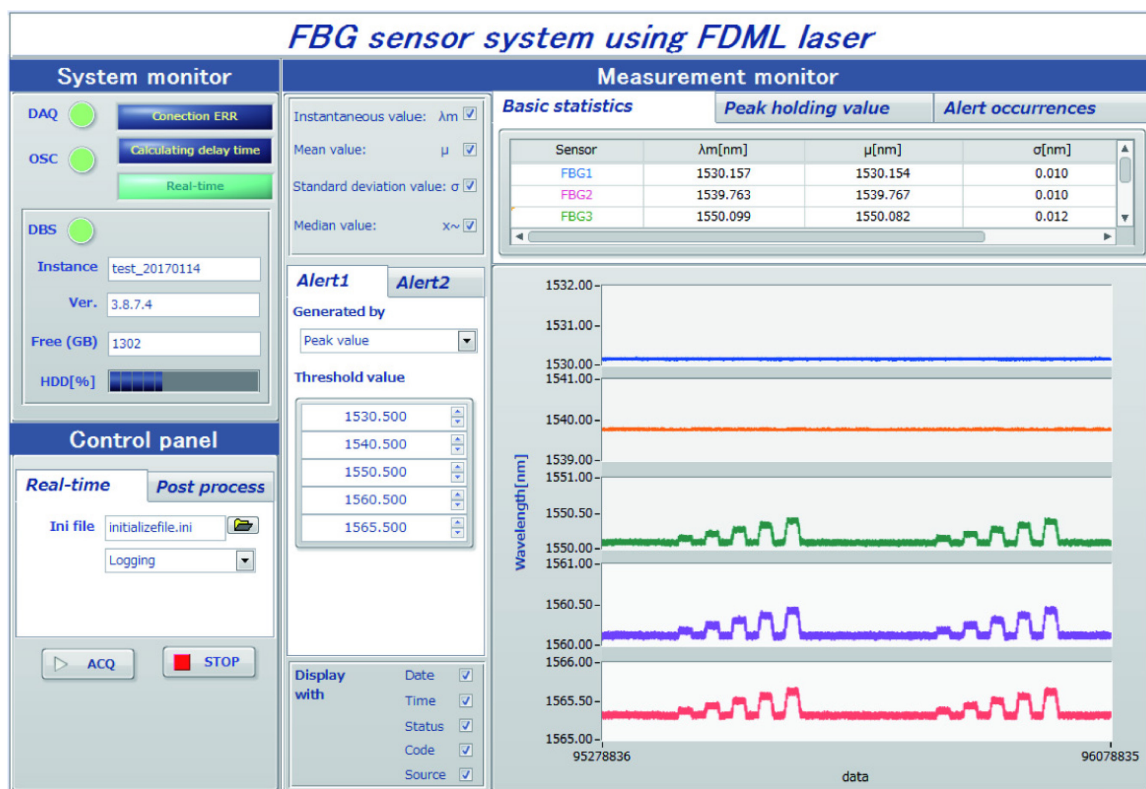


図4.6 計測システムのモニタ画面

### 4.3 FBG までのファイバ長の影響とその除去方法

ファイバ長の影響について検討するため、図 4. 7 に波長掃引レーザの正弦波掃引の波形と FBG の反射信号の対応関係を示す。この波長掃引の光を FBG に入射させると、検出器では FBG の反射信号が得られる。この反射信号は FBG のブラグ波長に依存してシフトする。そのため、反射信号の時間から波長の換算が行える。いま、FBG までのファイバ長の伝搬時間が無視できるとすると、波長掃引レーザの順掃引と逆掃引の光により、FBG の反射信号は時間  $t_F^{(0)}$ 、 $t_B^{(0)}$  として検出され、ブラグ波長  $\lambda_B$  を測定できる。しかしながら、波長掃引レーザの掃引周波数が高く、FBG までのファイバ長の伝搬時間の影響が無視できなくなる場合、計測システムにおける FBG までのファイバ長による遅延時間  $\tau$  の影響を受け、FBG の反射信号の時間が  $t_F^{(L)}$ 、 $t_B^{(L)}$  となる。これにより、換算される波長も本来の  $\lambda_B$  の波長から順掃引では  $\lambda_B^{(F)}$ 、逆掃引では  $\lambda_B^{(B)}$  にシフトする問題がある。したがって、ファイバ長による遅延時間の影響を除去する必要がある。

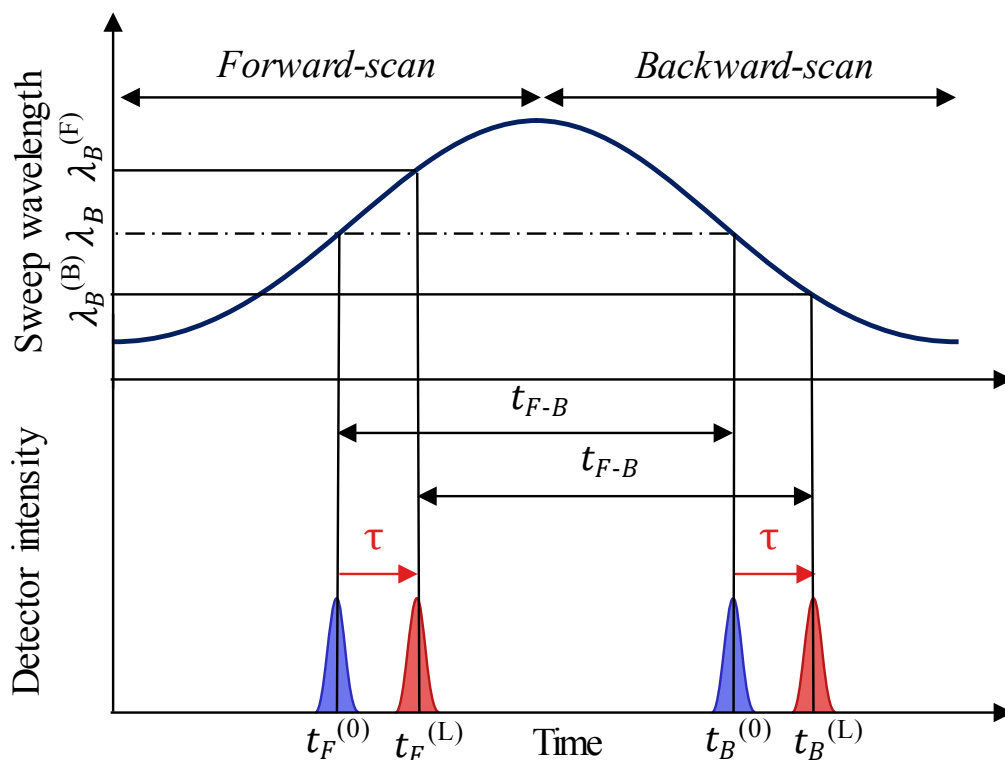


図 4. 7 ファイバ長による遅延時間の影響

そこで、ファイバ長による遅延時間を除去するため、遅延時間の算出方法を提案した。算出方法は図4. 8の算出フローに示す。検出器の信号はFPGAを用いた信号処理により、FBGの反射信号の時間  $t_F^{(L)}$ ,  $t_B^{(L)}$ を検出する。検出した2つの反射信号の時間から図4. 7に示す時間差  $t_{F-B}$ を算出する。この時間差  $t_{F-B}$ はFBGのブラッグ波長に依存して変化する。そのため、反射信号の時間差から波長の換算ができる。また、時間差  $t_{F-B}$ は(4. 1)式となり、遅延時間の項がキャンセルされるため、遅延時間の影響を受けることなく、波長の換算が可能である。

$$t_{F-B} = t_B^{(L)} - t_F^{(L)} = (t_B^{(0)} + \tau) - (t_F^{(0)} + \tau) \quad (4.1)$$

したがって、時間差  $t_{F-B}$ からFBGのブラッグ波長である  $\lambda_B$ が算出でき、遅延時間  $\tau$ を算出する。そして、FBGの反射信号の時間  $t_F^{(L)}$ ,  $t_B^{(L)}$ からこの遅延時間  $\tau$ を差し引くことにより、順掃引と逆掃引における半周期ごとに反射波長  $\lambda_m$ を算出することができる。

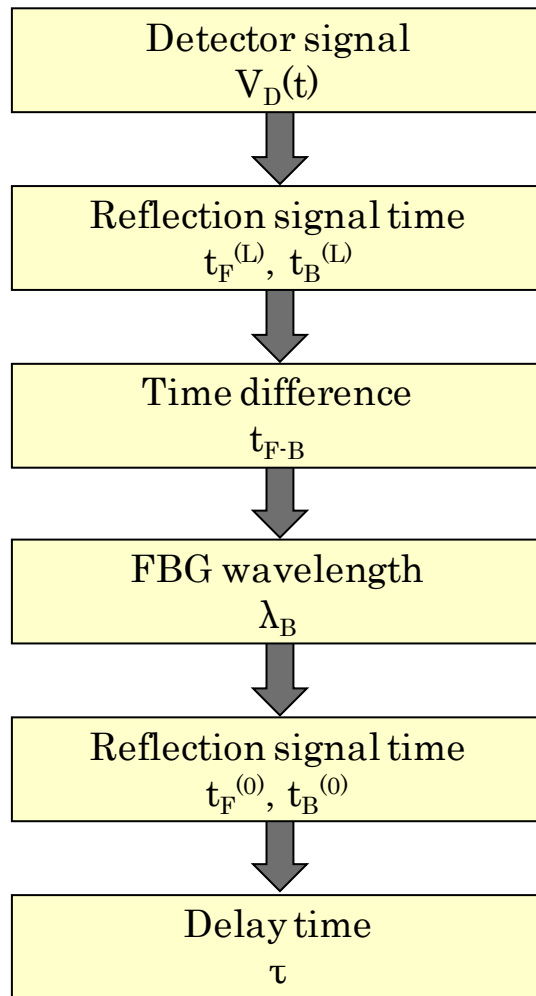


図4. 8 ファイバ長による遅延時間の算出フロー

## 4.4 実験の結果と検討

### 4.4.1 TC-FDML レーザの波長掃引特性

ここで、TC-FDML レーザを用いて FBG の反射波長測定を行うために TC-FDML レーザの発振波長と計測システムで測定した時間  $t_F^{(0)}$ 、 $t_B^{(0)}$  との関係測定した。

測定は図 4. 9 に示すように TC-FDML レーザの掃引光を波長可変フィルタ (OTF) (FFM-C, Axsun Technologies) に入射させ、そのときの透過信号を計測システムで行った。OTF の透過波長はデジタル入出力ボード (DIO) (PCIe-6361, National Instruments) によって制御した。OTF を透過した光はカップラにより 2 分され、一方の光は DAQ に入射し、時間  $t_{cp}$  を測定した。他方の光は波長モニタ (WM) (FB200, ANDO) により波長  $\lambda_{WM}$  が測定した。ファイバ長  $L_R$  は図 4. 4 における ( $L_{TR}+L_{RD}$ ) のファイバ長に合わせており、本実験による光の伝搬時間が計測システムの基準位置  $P_R$  からの反射光の伝搬時間と等しくなるようにした。これにより、測定した時間  $t_{cp}$  は図 4. 7 に示す計測システムの基準位置  $P_R$  からの反射信号の時間  $t_F^{(0)}$ 、 $t_B^{(0)}$  に相当する。

図 4. 10 に TC-FDML レーザの波長の測定結果および多項式近似の結果を示す。TC-FDML レーザの順掃引と逆掃引における発振波長が測定でき、掃引周波数 50.7kHz で正弦波状に掃引されていることがわかる。この結果より、8 次の多項式近似を用いて時間から波長を換算する。計測システムでは FBG の反射信号の時間  $t_F^{(0)}$ 、 $t_B^{(0)}$  を算出した後、この多項式近似を用いて、順掃引と逆掃引における反射波長を算出した。

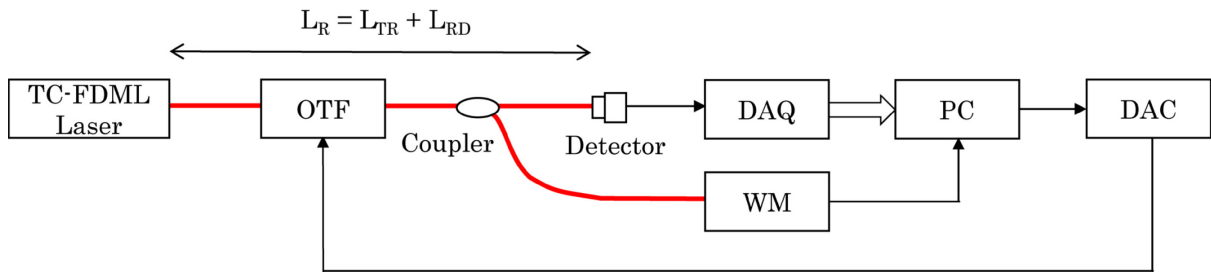


図 4. 9 TC-FDML レーザの波長掃引特性の装置構成

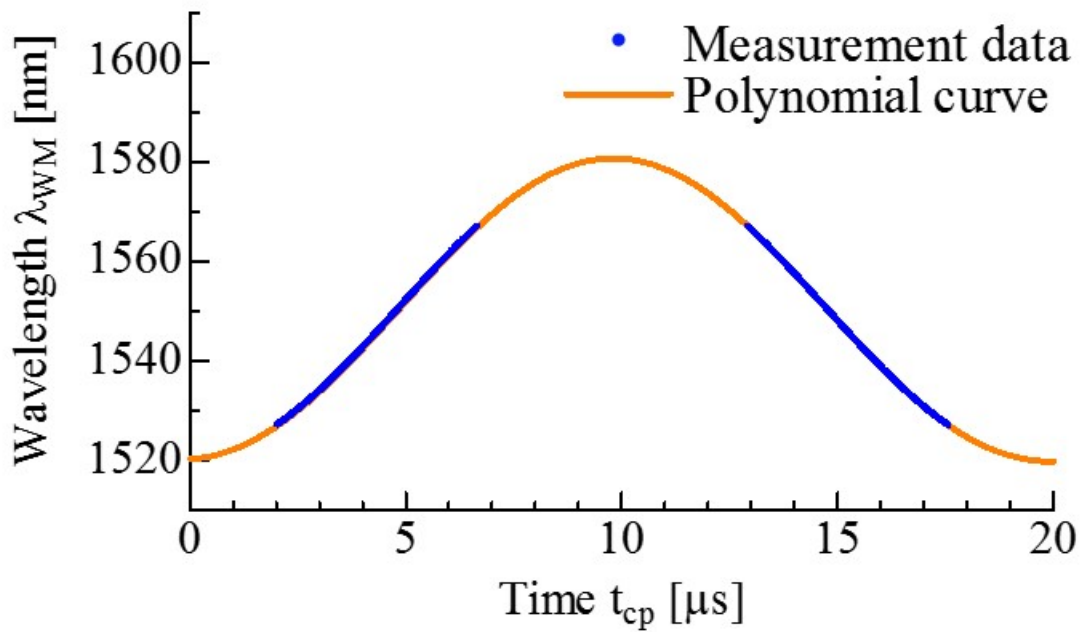
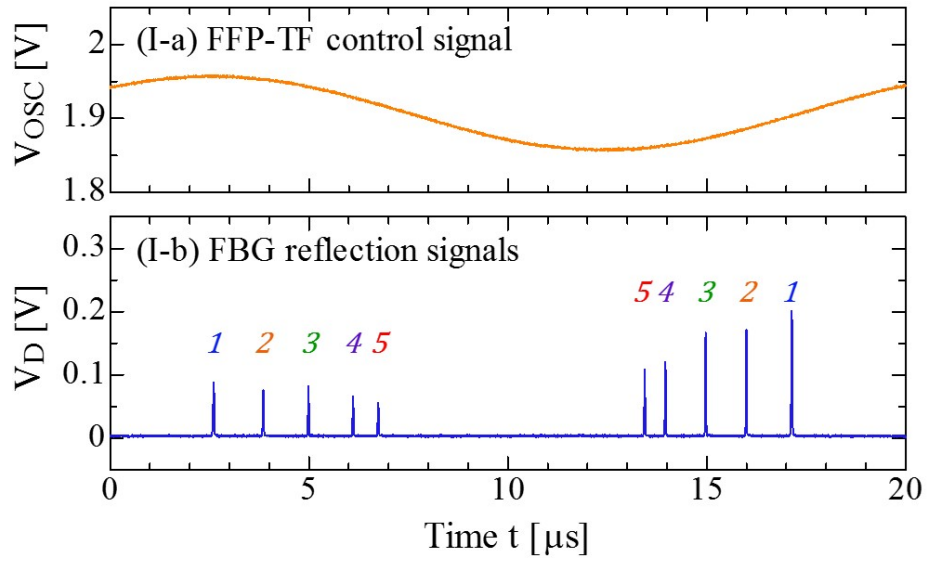


図 4. 10 TC-FDML レーザの波長掃引特性の結果

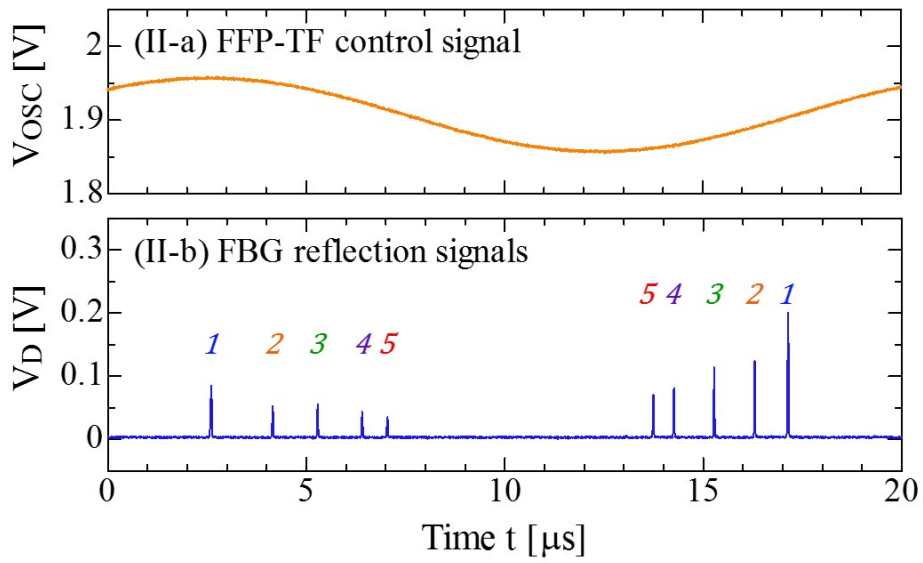
#### 4.4.2 ファイバ長による影響と除去

図4. 1 1は TC-FDML レーザを用いて測定した FBG の反射信号の結果である。同図(I)は FBG<sub>1</sub> と FBG<sub>2</sub> の間に遅延ファイバを挿入していないとき ( $\Delta L_D=0$  m) で、(I-a)は TC-FDML レーザの FFP-TF の制御信号、(I-b)は順掃引と逆掃引における FBG の反射信号の結果である。図中の番号は FBG の番号  $k$  を表している。設置した 5 つの FBG <sub>$k$</sub>  ( $k=1\sim 5$ ) はおのおののファイバ長  $L_k$  までの遅延時間を含んでおり、各 FBG の反射信号より、順掃引と逆掃引において時間  $t_F^{(L)}$ ,  $t_B^{(L)}$  が測定できている。TC-FDML レーザの双方向の波長掃引光を用いたことにより、掃引周期の半周期に相当する  $9.9 \mu\text{s}$  ごとに反射信号が検出できていることがわかる。同図(II)は FBG<sub>1</sub> と FBG<sub>2</sub> の間に遅延ファイバを挿入したとき ( $\Delta L_D=30$  m) の結果である。遅延ファイバの影響を受けて、FBG<sub>2</sub>~FBG<sub>5</sub> の反射信号がシフトしていることがわかる。そこで、図4. 4における基準位置  $P_R$  から FBG <sub>$k$</sub>  までのファイバ長  $L_k$  ( $k=1\sim 5$ ) と FBG の反射信号の時間との関係について実験を行った。





(I)  $\Delta L_D = 0$  m



(II)  $\Delta L_D = 30$  m

図4. 1 1 FBGの反射信号の結果

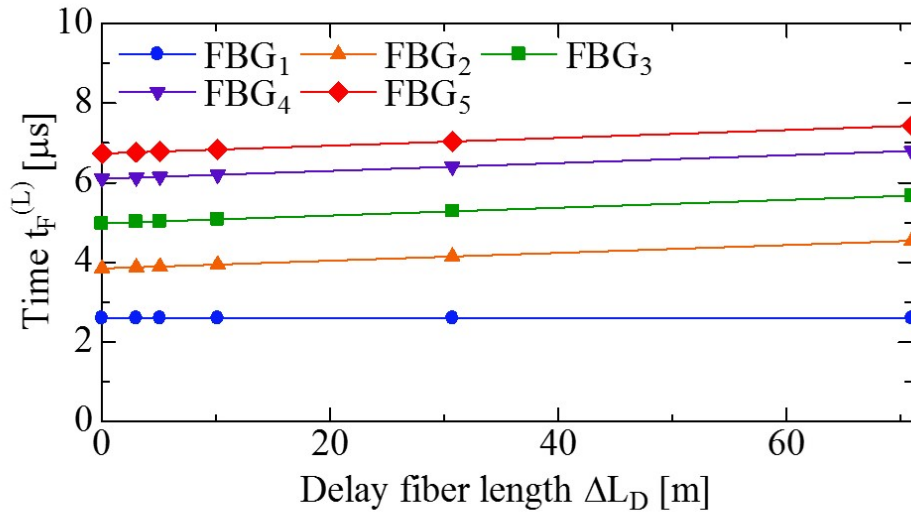
図4. 1 2は遅延ファイバの長さ  $\Delta L_D$  を用いてファイバ長  $L_k$  を変化させたときの各 FBG の反射信号の時間の測定結果である。図4. 1 2(a)は順掃引における5つのFBGの反射信号の時間  $t_F^{(L)}$  を測定した結果である。遅延ファイバの長さ  $\Delta L_D$  が長くなると、FBG<sub>2</sub>~FBG<sub>5</sub>の反射信号の時間が増加していることがわかる。また、最小2乗法による近似直線の傾きはFBG<sub>1</sub>において0.0 ns/m、FBG<sub>2</sub>~FBG<sub>5</sub>において9.8 ns/mとなった。基準位置  $P_R$  からFBG<sub>k</sub> ( $k=1\sim5$ ) までのファイバ長  $L_k$  ( $k=1\sim5$ ) による遅延時間  $\tau_k$  ( $k=1\sim5$ ) は(4. 2)式となる。

$$\tau_k = \frac{2nL_k}{c} \quad (4.2)$$

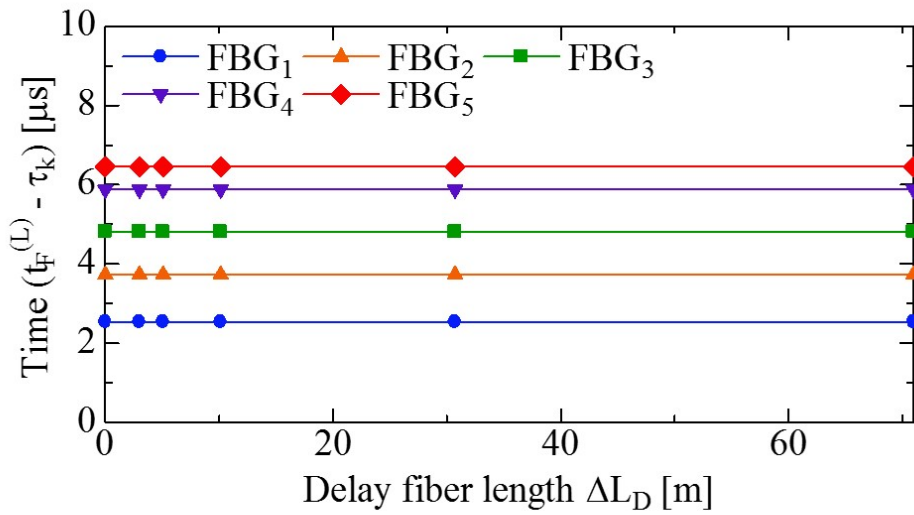
ただし、 $c$ は光速、 $n$ はコアの屈折率である。

ファイバの長さを1 mとした場合、(4. 2)式より遅延時間  $\tau$  は9.8 nsとなり、図4. 1 2(a)のFBG<sub>2</sub>~FBG<sub>5</sub>の近似直線の傾きに一致する。そこで、4. 3節で述べた遅延時間の算出方法を用いて、遅延時間の除去を行った。

図4. 1 2(b)は遅延時間  $\tau_k$  を除去したときのFBGの反射信号の時間 ( $t_F^{(L)} - \tau_k$ ) の結果である。時間 ( $t_F^{(L)} - \tau_k$ ) が遅延ファイバの長さ  $\Delta L_D$  の影響を受けずに一定になっている。さらに、 $\Delta L_D=0$  mにおける各FBGのファイバ長  $L_k$  の影響も除去できており、時間  $t_F^{(0)}$  の算出が行えている。このことから、本手法は図4. 4の基準位置  $P_R$  から各FBGまでのファイバ長  $L_k$  による遅延時間  $\tau_k$  を除去でき、反射信号の時間  $t_F^{(0)}$  を算出することができる。また、逆掃引においても同様の処理を行い、反射信号の時間  $t_B^{(0)}$  が算出できる。



(a) 遅延ファイバの影響がある場合



(b) 遅延ファイバの影響を除去した場合

図4. 1 2 遅延ファイバによる反射信号の結果 (順掃引)

本システムが FBG までのファイバ長の影響を除去できていることを実証するため、静的ひずみによる実験を行った。静的ひずみを印加するため、図 4. 1 3 に示すように FBG<sub>4</sub> を含むファイバの両端に固定ステージと可動ステージを固定した。2つのステージの間隔  $L_{\text{stage}}$  は 1 m としている。取り付けた可動ステージを  $\Delta X_{\text{FBG4}} \mu\text{m}$  移動させることにより、ひずみ  $\Delta \varepsilon_{\text{FBG4}} \mu\varepsilon (= \Delta X_{\text{FBG4}} / L_{\text{stage}})$  が加わる。実験は可動ステージの移動量  $\Delta X_{\text{FBG4}}$  を 100  $\mu\text{m}$  ごと増加させた。

図 4. 1 4 はファイバ長の影響がある場合のひずみによる FBG<sub>4</sub> の反射波長  $\lambda_{m4}$  の結果である。同図(a)は遅延ファイバを挿入していない場合 ( $\Delta L_D=0$  m) の結果である。順掃引と逆掃引により測定した反射波長の値がひずみの印加にともない、長波長側にシフトしていることがわかる。ここで、 $\Delta X_{\text{FBG4}}=0 \mu\text{m}$  の反射波長  $\lambda_{m4}$  は、順掃引のとき 1562.20 nm、逆掃引のとき 1558.06 nm となっている。これは基準位置  $P_R$  から FBG<sub>4</sub> までのファイバ長による遅延時間の影響を受けて、順掃引の反射波長が長波長側に、逆掃引の反射波長が短波長側にシフトして測定されているためである。同図(b)は遅延ファイバを挿入した場合 ( $\Delta L_D=30$  m) の反射波長の結果である。 $\Delta X_{\text{FBG4}}=0 \mu\text{m}$  の反射波長の値は、順掃引が 1564.73 nm、逆掃引が 1555.18 nm となっており、遅延ファイバを挿入したことによりシフト量が増加していることがわかる。

図 4. 1 5 はファイバ長の影響を除去したときの結果である。同図(a)の  $\Delta X_{\text{FBG4}}=0 \mu\text{m}$  の反射波長  $\lambda_{m4}$  は、順掃引と逆掃引ともに 1560.15 nm となっており、 $P_R$  から FBG<sub>4</sub> までのファイバ長による遅延時間の影響を除去できている。同図(b)の遅延ファイバを挿入した場合 ( $\Delta L_D=30$  m) も同様に、遅延時間の影響が除去できている。最小 2 乗法を用いて直線近似の傾きを算出すると、順掃引と逆掃引の傾きは約  $1.2 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\text{m}$  となり、波長モニタ WM の測定結果と一致した。本システムは、遅延時間の影響を除去でき、順掃引と逆掃引の双方向の掃引を用いて反射波長を測定できる。

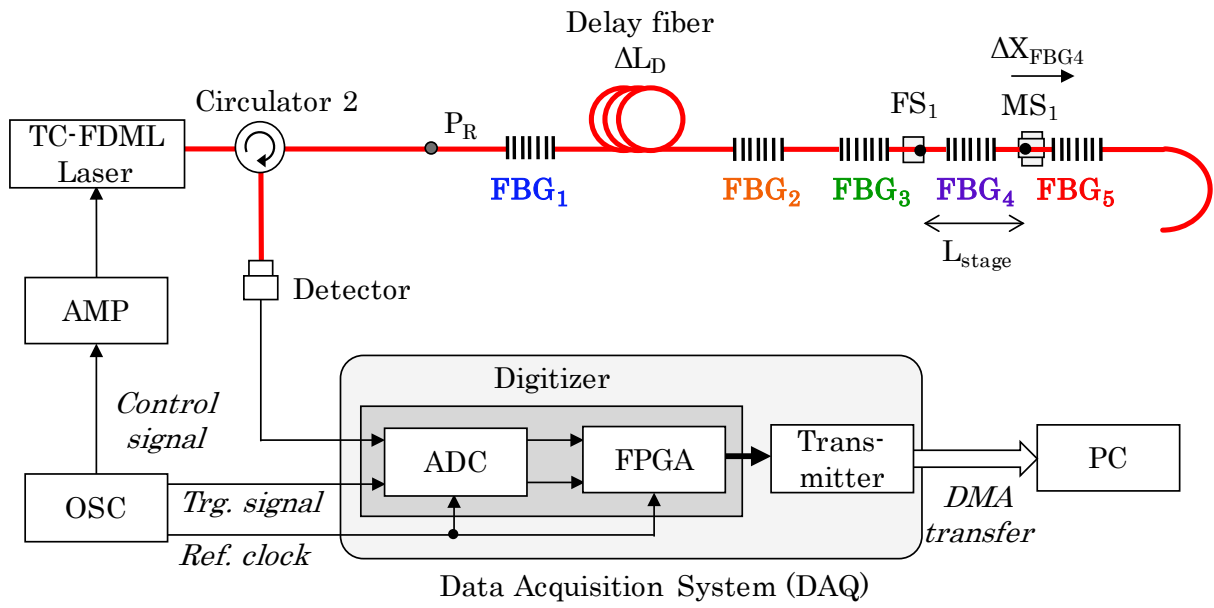


図4. 13 本システムを用いた静的ひずみ測定

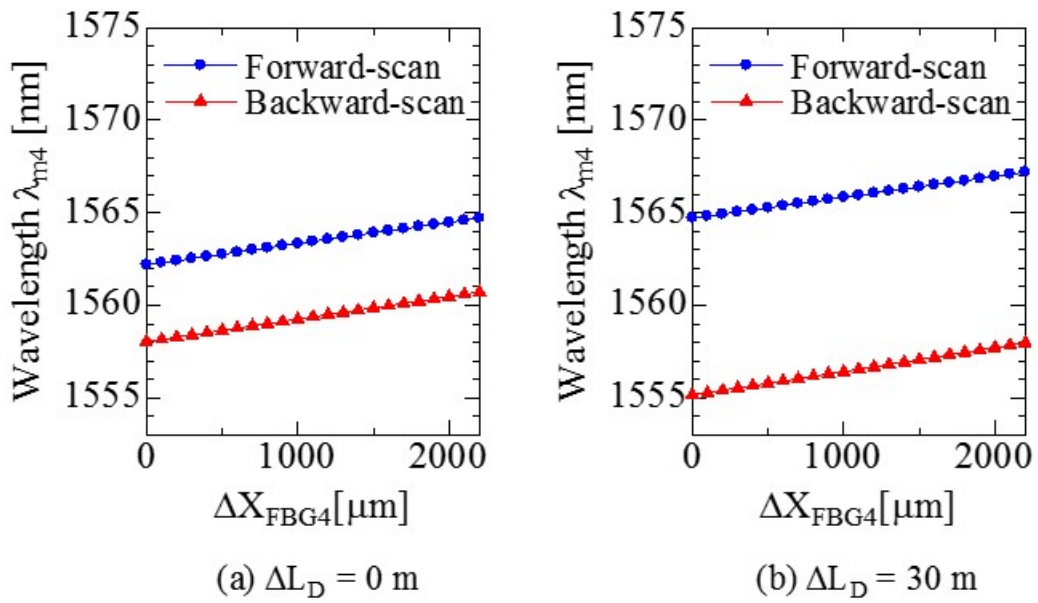


図4. 1 4 ファイバ長の影響がある場合のひずみによる反射波長の測定結果

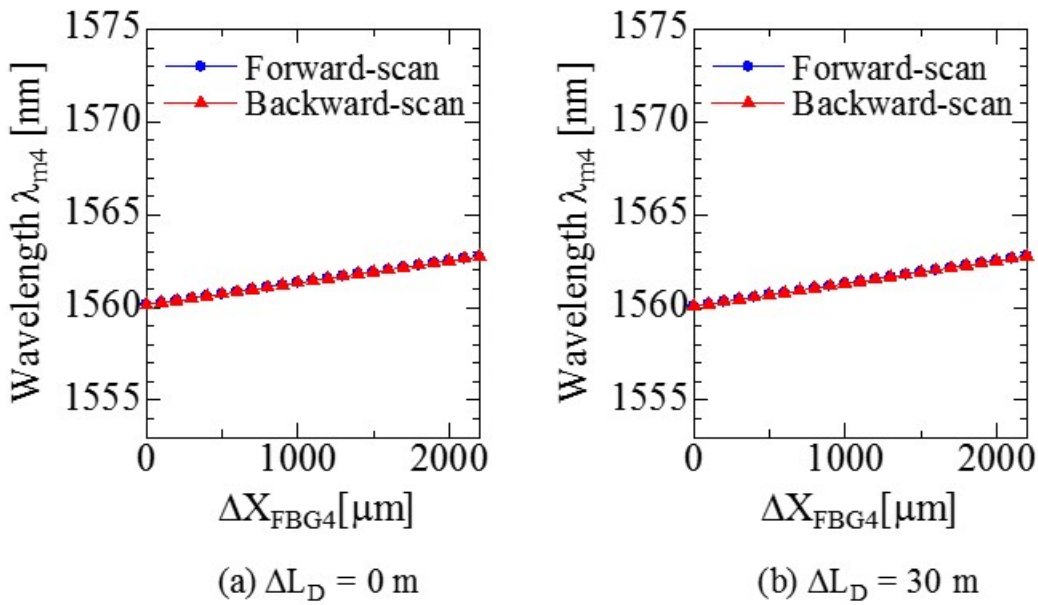
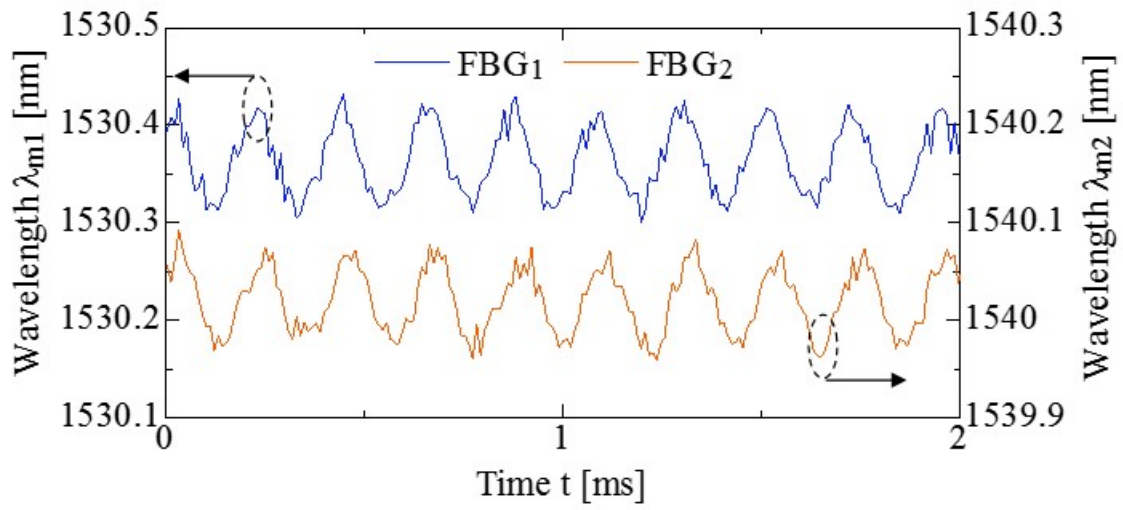


図4. 1 5 ファイバ長の影響を除去した場合のひずみによる反射波長の測定結果

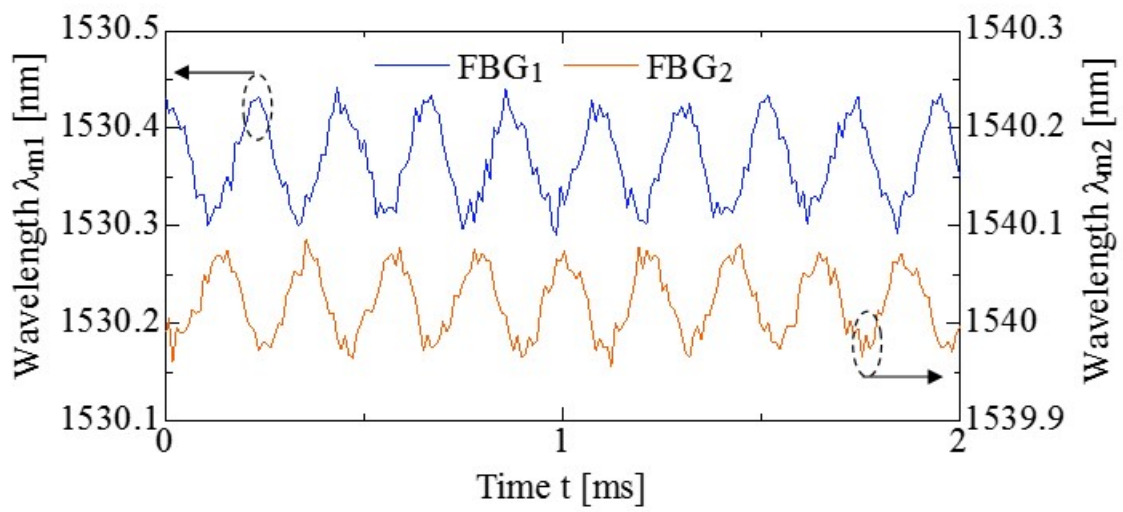
#### 4.4.3 高速振動測定の結果

本システムが高速な振動を測定できることを実証するため、2つの圧電振動子を用いて振動を印加した。圧電振動子 1, 2 はおのおの FBG<sub>1</sub>, FBG<sub>2</sub>に取り付け、振動周波数  $f_v$  は 4.65 kHz とした。

図 4. 16 は 2つの圧電振動子を同時に振動させたときの FBG<sub>1</sub>, FBG<sub>2</sub>の反射波長の測定結果である。同図(a)は圧電振動子 1, 2 の印加電圧を同位相 ( $\varphi_1=\varphi_2$ ) としたときの結果である。FBG<sub>1</sub>, FBG<sub>2</sub>の反射波長は圧電振動子の振動周波数である 4.65 kHz で正弦波状に振動しており、反射波長の変化量は約 0.1 nm となっている。本システムは TC-FDML レーザの双方向の掃引光を用いたことにより掃引周期の半周期に相当する 9.9  $\mu$ s ごとに反射波長の測定が行えている。同図(b)は圧電振動子 1, 2 の印加電圧の位相差 ( $\varphi_2-\varphi_1$ ) を  $\pi$  としたときの結果である。高速振動している 2つの振動波形の位相の関係を測定できていることがわかる。本システムは数 kHz の高速な振動の測定が行え、FBG 間の振動波形の位相の関係も測定できることを示した。



(a)  $\varphi_1 = \varphi_2$



(b)  $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$

図 4. 1 6 高速振動による FBG の反射波長の測定結果



#### 4.4.4 長時間の測定結果

つぎに、本システムの高速かつ長時間の測定を確認するため、反射波長の実時間測定を行った。4.4.2節の静的ひずみの印加と同様、FBG<sub>3</sub>、FBG<sub>5</sub>には同型の可動ステージを取り付けており、瞬時的なひずみを10 minごとに印加した。瞬時的なひずみは可動ステージをパルス状に駆動（移動速度5000 μm/s）させ、時間間隔400 msで移動量をおのおの50, 100, 150, 200, 250 μmとした。

図4.17(a), (b), (c)は反射波長の実時間測定を1時間行った。同図(b), (c)より、FBG<sub>3</sub>、FBG<sub>5</sub>は10 minごとの印加した瞬時的なひずみを検出できていることがわかる。このとき、ひずみを印加していないときの反射波長の標準偏差の値はおのおの $1.3 \times 10^{-2}$  nm以下であり、ひずみに換算すると、約16 μεとなる。このことから、本システムは16 μεに相当するひずみの測定分解能を有している。

図4.18は図4.17のt=10 minのときの時間領域を拡大した結果である。また、図中の右上部にはt=601.6 s周辺の時間領域を拡大した結果を表示している。可動ステージの移動量を50, 100, 150, 200, 250 μmとしたひずみによる反射波長の変化量はおのおの約 $6 \times 10^{-2}$ ,  $12 \times 10^{-2}$ ,  $18 \times 10^{-2}$ ,  $24 \times 10^{-2}$ ,  $30 \times 10^{-2}$  nmとなっており、本システムが瞬時的なひずみを印加したFBG<sub>3</sub>、FBG<sub>5</sub>の反射波長の変化を測定できていることがわかる。

図4.19は図4.17のt=50 minのときの時間領域を拡大した結果である。これより50 minが経過した時間領域においても、図4.18と同様に、可動ステージの移動量を50, 100, 150, 200, 250 μmとしたひずみによる反射波長の変化量がおのおの測定できている。以上のことから、本システムは1時間にわたり、複数のFBGの反射波長を高速かつ長時間測定できることを示した。

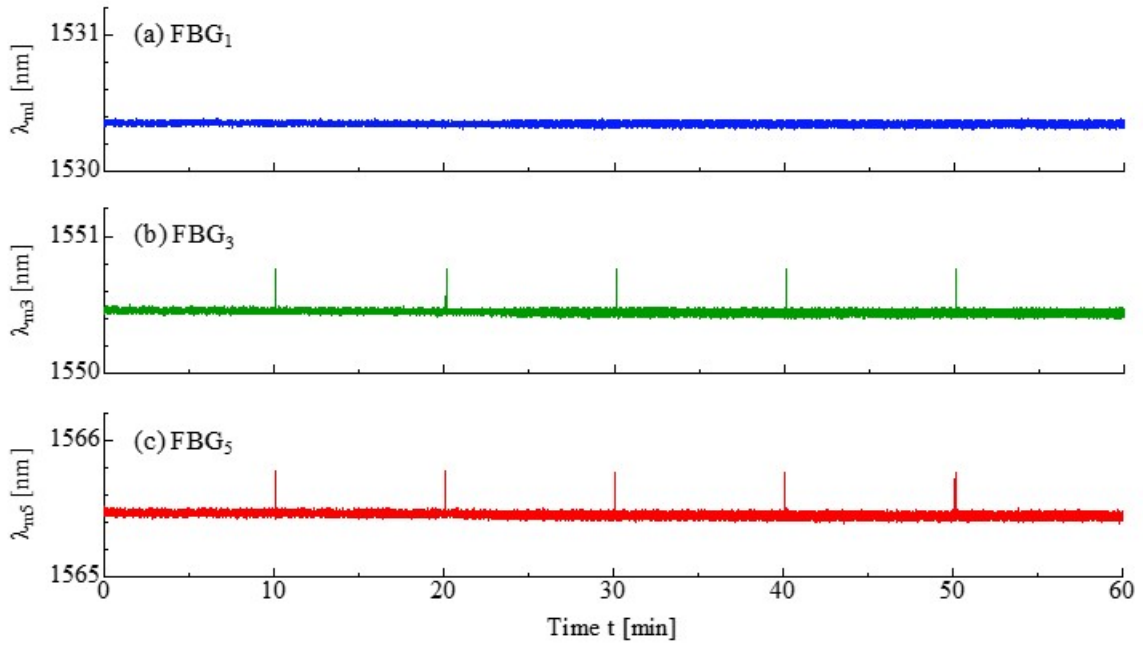


図4. 17 反射波長の実時間測定の結果

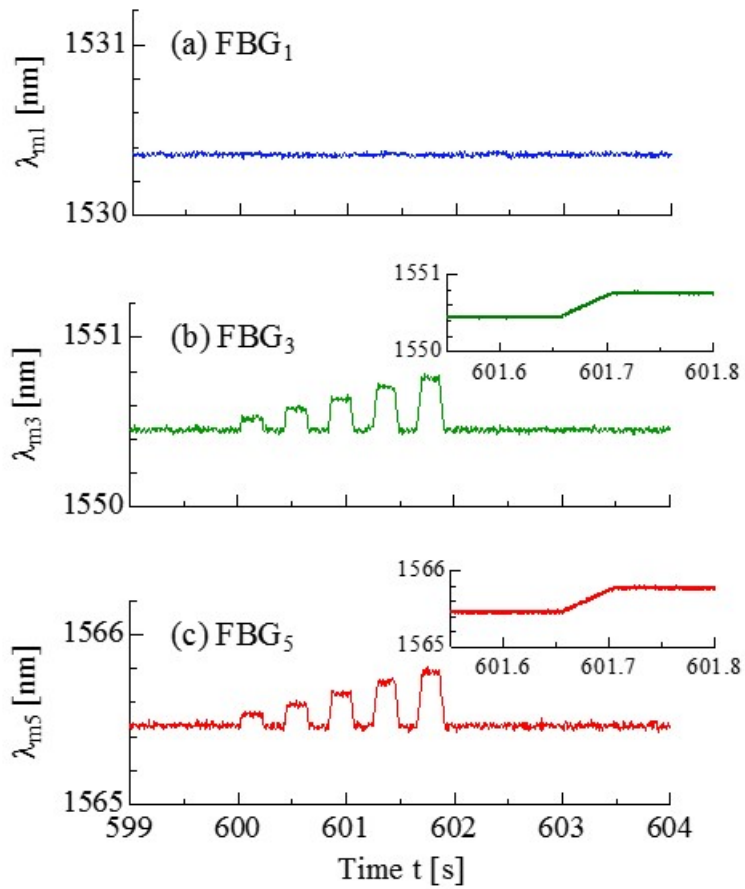


図4. 18 図4. 17の  $t = 10 \text{ min}$  の時間領域を拡大した結果

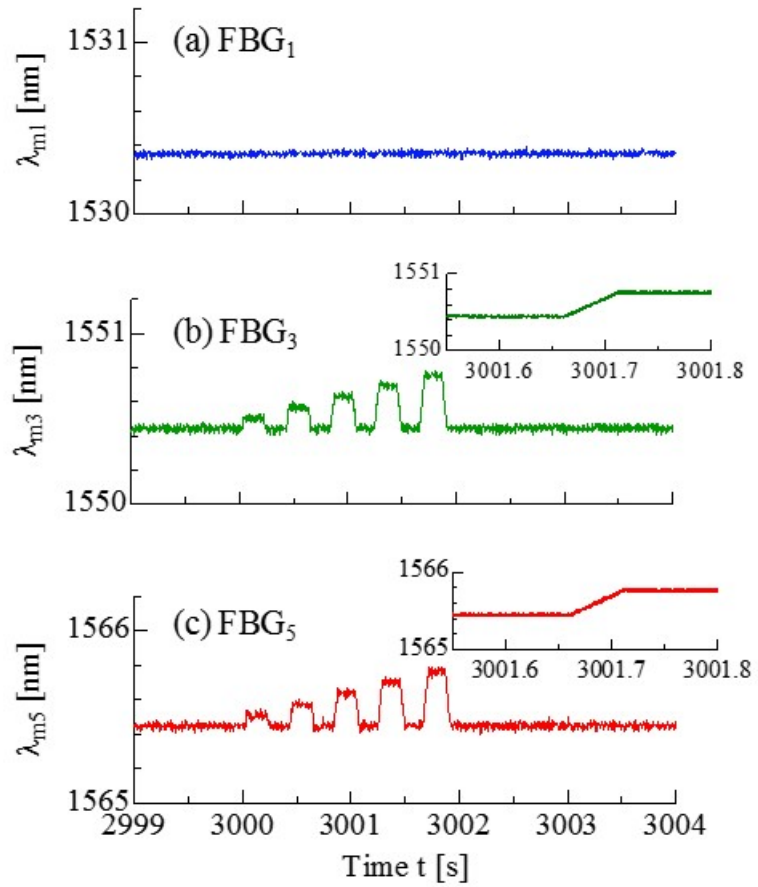


図 4. 1 9 図 4. 1 7 の  $t = 50 \text{ min}$  の時間領域を拡大した結果

## 4.5 まとめ

本章の結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 構築した TC-FDML レーザは掃引周波数が 50.7 kHz において、約 60 nm の掃引波長の帯域幅を有し、順掃引と逆掃引の双方向の波長掃引が行える。
- (2) TC-FDML レーザを用いた FBG の計測システムはサンプリング周波数を 250 MHz とし、FPGA を用いた信号処理により、実時間測定を実現した。
- (3) 本システムは提案した FBG までのファイバ長による遅延時間の算出処理を組み込んでおり、遅延時間を除去した反射波長の測定が行えることを明らかにした。また、TC-FDML レーザの双方向の掃引光を用いることにより測定時間分解能が掃引周期の半分である 9.9  $\mu\text{s}$  の性能を有していることを明らかにした。
- (4) 本システムは反射波長の標準偏差の値が  $1.3 \times 10^{-2}$  nm 以下であり、本システムは 16  $\mu\text{e}$  に相当するひずみの測定分解能を有しており、数 kHz の高速な振動測定が行え、1 時間の連続測定ができることを示した。

## 第5章 結言

### 5.1 本研究で得られた成果

本論文の成果をまとめると以下の通りになる。

- 第2章「波長掃引レーザを用いたFBGの反射波長測定の基本構成」では

ファイバセンサであるFBGの基本特性について述べ、ブラッグ波長の光のみを反射する性質を有すること、ブラッグ波長がひずみに比例して変化することから、FBGの反射波長を測定することにより、ひずみが測定できることを述べた。波長掃引レーザを用いたFBGの反射波長測定の基本構成について述べ、FBGの反射信号の時間から反射波長を算出する方法について述べた。さらに、FBGの反射波長の高分解能化を図るために、重心法を用いたピーク位置検出の方法を示した。

- 第3章「リング共振器型波長掃引レーザを用いた実時間振動計測システム」では

構築したリング共振器型波長掃引レーザは掃引波長の帯域幅が約15 nmにおいて掃引周波数を20 kHzとした動作が行えることを示した。リング共振器型波長掃引レーザによるFBGの実時間振動計測システムはPCを用い、ADCのサンプリング周波数を40 MHzとした信号処理により、FBGの実時間測定が行える。本システムはリング共振器型波長掃引レーザの掃引周波数を20 kHzで駆動し、複数のFBGの反射波長を時間分解能が50  $\mu$ sにおいて測定できる。振動測定では、数百 Hzの振動が測定でき、反射波長の標準偏差の値は $2 \times 10^{-3}$  nm以下であり、ひずみに換算すると、約2.4  $\mu$ eとなることから、本システムは2.4  $\mu$ eに相当するひずみの測定分解能を有している。データベースを用いたデータ管理システムを導入し、12時間を超えるFBGの高速な反射波長測定が行えることを示した。本システムは2種類のアラートの発生機能を実装し、おのおののアラートにより瞬時的なひずみが発生した区間を検出できる。

● 第4章「TC-FDML レーザを用いた FPGA による実時間振動計測システム」では

構築した TC-FDML レーザは掃引周波数が 50.7 kHz において、約 60 nm の掃引波長の帯域幅を有し、順掃引と逆掃引の双方向の波長掃引が行える。TC-FDML レーザを用いた FBG の計測システムはサンプリング周波数を 250 MHz とし、FPGA を用いた信号処理により、実時間測定を実現した。本システムは提案した FBG までのファイバ長による遅延時間の算出処理を組み込んでおり、遅延時間を除去した反射波長の測定が行えることを明らかにした。また、TC-FDML レーザの双方向の掃引光を用いることにより測定時間分解能が掃引周期の半分である 9.9  $\mu$ s の性能を有していることを明らかにした。本システムは反射波長の標準偏差の値が  $1.3 \times 10^{-2}$  nm 以下であり、本システムは 16  $\mu$ s に相当するひずみの測定分解能を有しており、数 kHz の高速な振動測定が行え、1 時間の連続測定ができることを示した。

## 5.2 今後の展望

構築した計測システムは、長時間の計測を目的に、データベースを用いたデータ管理システムとアラート機能を実装している。これにより、振動などが印加された区間をデータベースより容易に取得でき、取得した信号波形から振動の最大振幅、継続時間、周波数、エネルギーなどを解析することも可能になる。今後、波長掃引レーザと信号処理システムのより一層の高速化により、さらなる高速な振動測定が期待できる。

また、今後のさらなる展開として、本システムを用いて実構造物における検証実験を行い、アコースティックエミッション（AE）波を測定することである。現在、石油タンクや地下貯蔵タンクなどにおいて、電気式センサを用いた1~2時間の連続測定による損傷評価が行われており<sup>[35,36]</sup>、このような危険区域のモニタリングなどに適用されることが期待される。

## 謝辞

本論文は、博士後期課程において、篠田之孝教授のご指導のもとに研究を行った内容である。篠田之孝教授にはこのような意義深い研究テーマを与えていただいただけでなく、実験のための十分な設備を与えていただいたこと、国内外の学会で発表する多くの機会を与えていただいたこと、論文執筆のご指導をいただいたことなど、大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。

小野隆教授には論文作成にあたり、計測工学の立場から有益なご助言とご討論をいただきました。古川慎一教授には光通信工学ならびに情報伝送工学の立場から懇切なご指導とご助言をいただきました。電子工学専攻の大谷昭仁教授には光計測および通信・ネットワーク工学の立場から本論文の細部までご指導いただきました。御礼申し上げます。

日ごろから、貴重なご助言・ご指導をいただきました門馬英一郎専任講師、松村太陽助教には心より御礼申し上げます。さらに日ごろ、ご指導、ご鞭撻いただきました電気工学科の諸先生方に深く感謝申し上げます。また、小倉泉教授（首都大学東京健康福祉学部放射線学科）には、実験装置の回路の作成などのご指導をいただき、心より感謝いたしております。

また、本研究は、篠田研究室の諸先輩方と後輩からの多くのご協力により、遂行することができました。ファイバ計測に関する実験にご協力いただきました新井隆氏（博士前期課程修了）、金井智英氏（同課程修了）、新井雅人氏（同課程修了）、野口歩氏（同課程2年）、石原圭祐氏（同課程1年）には感謝いたします。

最後に、このような論文作成にこぎつけることができましたのも、ひとえに、諸先生方や研究室の学生方のお力添えのおかげと、深く感謝の意を表します。



## 参考文献

1. J. M. Lopez-Higuera ed., *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, Wiley (2002).
2. L. Jun, “FBG application in bridge health monitoring system of Wuhan Yangtze River 2th Bridge,” *Proc. SPIE 7503*, 75035H (2009).
3. S. Jang et al., “Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation,” *Smart Struct. Syst.*, **6**(5-6), 439-459 (2010).
4. S. Takeda et al., “Delamination monitoring of laminated composites subjected to low-velocity impact using small-diameter FBG sensors,” *Compos. Part A-Appl. S.*, **36**(7), 903-908 (2005).
5. H. Tsuda et al., “Acoustic emission measurement using a strain-insensitive fiber Bragg grating sensor under varying load conditions,” *Opt. Lett.*, **34**(19), 2942-2944 (2009).
6. 水口 他：多重化 FBG 光ファイバセンサの動ひずみ計測による CFRP フォームコアサンドイッチ構造の衝撃同定，日本航空宇宙学会論文集，**59**(691), 212-221 (2011).
7. T. Horiguchi, T. Kurashima, and M. Tateda, “A technique to measure distributed strain in optical fibers,” *IEEE Photonic. Tech. L.*, **2**(5), 352-354 (1990).
8. M. Jiang, and E. Gerhard, “A simple strain sensor using a thin film as a low-finesse fiber-optic Fabry–Perot interferometer,” *Sens. Actuators A Phys.*, **88**(1), 41-46 (2001).
9. A. Othonos, and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings*, Artech House (1999).
10. A. D. Kersey et al., “Fiber Grating Sensors,” *J. Lightwave Technol.*, **15**(8), 1442-1463 (1997).
11. C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, “Instrumentation for interrogating many-element fiber Bragg grating arrays,” *Proc. SPIE 2444*, 257-266 (1995).
12. M. D. Todd, G. A. Johnson, and B. L. Althouse, “A novel Bragg grating sensor interrogation system utilizing a scanning filter, a Mach-Zehnder interferometer and a 3×3 coupler,” *Meas. Sci. Technol.*, **12**(7), 771-777 (2001).
13. Y. Shinoda et al., “Fundamental Experiment of Multiple-point Measurement for Strain by Fiber Bragg Gratings using Optical Frequency Sweeping,” *Proc. SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, 1672-1675 (2006).

14. Z. He, T. Hayashi, and K. Hotate, "High-speed interrogation of multiplexed fiber Bragg grating sensors with similar Bragg wavelength by synthesis of optical coherence function," *Proc. SPIE* **6004**, 600409 (2005).
15. N. Takahashi, K. Yoshimura, S. Takahashi and K. Imamura, "Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating," *Ultrasonics*, **38**(1), 581-585 (2000).
16. 津田 他 : 光ファイバ広帯域振動検出システムの開発, *Synthesiology*, **6**(1), 45-54 (2013).
17. S .H. Yun, D. J. Richardson, and B. Y. Kim, "Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser," *Opt. Lett.*, **23**(11), 843-845 (1998).
18. T. Saitoh et al., "Ultra-Long-Distance Fiber Bragg Grating Sensor System," *IEEE Photonic. Tech. L.*, **19**(20), 1616-1618 (2007).
19. R. Isago, and K. Nakamura, "A high reading rate fiber Bragg grating sensor system using a high-speed swept light source based on fiber vibrations," *Meas. Sci. Technol.*, **20**(3), 034021 (2009).
20. Y. Nakazaki, and S. Yamashita, "Fast and wide tuning range wavelength-swept fiber laser based on dispersion tuning and its application to dynamic FBG sensing," *Opt. Express*, **17**(10), 8310-8318 (2009).
21. E. J. Jung et al., "Characterization of FBG sensor interrogation based on a FDML wavelength swept laser," *Opt. Express*, **16**(21), 16552-16560 (2008).
22. R. Huber, M. Wojtkowski, and J. G. Fujimoto, "Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography," *Opt. Express*, **14**(8), 3225-3237 (2006).
23. R. Huber et al., "Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging: design and scaling principles," *Opt. Express*, **13**(9), 3513-3528 (2005).
24. T. Yamaguchi, and Y. Shinoda, "Real-time Measurement of Reflection Wavelength of Fiber Bragg Gratings with Tunable Wavelength-swept Light Source," *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, **135**(12), 756-761 (2015).
25. T. Yamaguchi, and Y. Shinoda, "Development of fast FBG interrogator with wavelength-swept laser," *Proc. SPIE* **9506**, 95061F (2015).
26. T. Yamaguchi, and Y. Shinoda, "High-speed and long-time FBG interrogation system using wavelength swept laser," *Proc. SPIE* **9525**, 95252X (2015).

27. 山口, 篠田 : データベースを用いたファイバブラッググレーティングの反射波長測定システムの構築, 計測自動制御学会論文集, **53**(8), 473-479 (2017).
28. D. Chen, C. Shu, and S. He, "Multiple fiber Bragg grating interrogation based on a spectrum-limited Fourier domain mode-locking fiber laser," *Opt. Letter*, **33**(13), 1395-1397 (2008).
29. B.C.Lee et al., "Dynamic and static strain fiber Bragg grating sensor interrogation with a 1.3  $\mu\text{m}$  Fourier domain mode-locked wavelength-swept laser," *Meas. Sci. Technol.*, **21**(9), 094008 (2010).
30. M.A.B.Abdallah et al., "High-speed tunable FDML laser, interfaced to a continuous FPGA acquisition system, for FBG accelerometer interrogation," *Proc. IEEE Sensors 2014* (2014).
31. T. Yamaguchi, and Y. Shinoda, "Development of FBG interrogation system using wavelength sweeping of FDML laser," *Proc. IEEE Sensors 2016* (2016).
32. T. Yamaguchi, and Y. Shinoda, "High-speed vibration measurement by fiber Bragg gratings with Fourier domain mode locking laser," *Proc. SPIE 10323*, *25th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 103232I (2017).
33. T. Yamaguchi, and Y. Shinoda, "Real-time fiber Bragg grating measurement system using temperature-controlled Fourier domain mode locking laser," *Opt. Eng.*, **56**(6), 066112 (2017).
34. T. Yamaguchi, and Y. Shinoda, "Multi-channel High-speed Fiber Bragg Grating Interrogation System Utilizing a Field Programmable Gate Array," *IEEE Sensors Letters*, **2**(1) (2018) (in press).
35. 山田 他 : AE 法による石油タンク底部の腐食損傷評価, 圧力技術, **40**(4), 50-55 (2002).
36. 前田 他 : AE 法による地下貯蔵タンクの腐食損傷評価, 圧力技術, **51**(5), 269-275 (2013).