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

山口 達也*・篠田 之孝**

Construction of Reflection Wavelength Measurement System of Fiber Bragg Gratings Using Database

Tatsuya YAMAGUCHI* and Yukitaka SHINODA**

The objective of this research is the construction of a high-speed and long-time strain measurement system that uses fiber Bragg grating (FBG) for determining health of structures. We constructed a high-speed and long-time measurement system that was accomplished by combining a FBG measurement system using wavelength swept laser and a data management system using database. This FBG measurement system was able to drive wavelength swept laser with sweep frequency of 20 kHz and had a temporal resolution of 50 μ s. The data management system could manage the large volume of the data obtained from high-speed measurement. In this paper, we report on high-speed and long-time measurement for detecting instantaneous strain over 12 hours.

Key Words: fiber Bragg grating, vibration measurement, strain measurement, real-time measurement, database

1. はじめに

構造物の健全性を把握する構造ヘルスマニタリング技術¹⁾は、橋梁やトンネルなどの老朽化、あるいは地震や津波などの自然災害の安全対策として重要性が増している²⁾。また、橋梁などの大型構造物では複数のセンサ情報を統合するため、データベースを用いたモニタリングも行なわれている³⁾。特に、近年は、航空機や船舶などの稼働構造物にセンサを埋め込み、損傷箇所を推定するような高速なモニタリング技術の開発も進められている⁴⁾。

光ファイバ型センサは電気型のセンサと比べて、防爆性、耐腐食性に優れ、電磁誘導の影響を受けず、周囲の環境変化に強い特徴を有している。さらには、センサ部に電源が不要であるため、ファイバを保護するような被覆を施すことで構造物に埋め込むことも可能である¹⁾。光ファイバ型センサであるファイバブラッググレーティング (FBG) は通常の光ファイバのコア部に回折格子を形成し、特定の波長領域 (ブラッグ波長) の光のみを反射する性質がある。また、FBG は光

ファイバの長手方向のひずみに比例して、反射波長が長波長側にシフトする。これを利用し、FBG はひずみ測定用のセンサとして用いられる^{1), 5), 6)}。

FBG の反射波長を測定するための光学系は干渉方式、波長掃引方式、分光方式など種々提案されている^{7)~20)}。特に、FBG を用いて広帯域な振動を測定する方法として干渉方式、レーザ復調方式、波長掃引方式などがある。ここで、干渉方式は 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、ブラッグ波長の値を測定できず、静的なひずみが検出できない問題がある⁸⁾。また、レーザ復調方式は 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、レーザ復調方式は FBG が静的なひずみを受けると、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、制御する課題がある¹⁹⁾。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方式が提案されている。この方式は光アンプと FBG を用いて光ファイバリング共振器を構成している。しかし、多点化の際には反射波長を多重化した FBG の個数分だけ、光アンプを必要とする問題がある²⁰⁾。

一方、波長掃引方式は波長掃引レーザ、単一の光検出器と多重化した FBG で構成される^{12)~15)}。この方式は FBG の多重化が容易であり、レーザの発振波長を掃引させ、FBG からのブラッグ波長の光を反射時間の変化として検出する。こ

* 日本大学大学院理工学研究科
東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

** 日本大学理工学部 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

* Graduate School of Science and Technology, Nihon University, 1-8-14 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo

** College of Science and Technology, Nihon University, 1-8-14 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received February 14, 2017)

(Revised May 8, 2017)

のとき、波長掃引レーザの掃引周波数を高速化させることにより、FBGの広帯域の振動測定が可能となる。波長掃引方式は光の反射時間を算出する必要がある、実時間測定には信号処理を高速化させる必要がある。さらに、高速な掃引周波数かつ長時間の実時間測定した際、データ量が膨大になるため、そのデータ管理を含めた実時間測定システムは報告されていない。

そこで、筆者らは波長掃引レーザによるFBGの反射波長測定システム^{21), 22)}と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、高速かつ長時間測定できる実時間システムを構築している²³⁾。本稿では、本システムのさらなる高速化を図るため、FBGの反射波長測定システムの波長掃引レーザの掃引周波数を20 kHzで高速に駆動した。これにより、本システムは複数のFBGの反射波長を50 μ sの時間分解能で高速測定できる。データ管理システムはデータベースを用いることにより、高速測定した大量のデータを管理でき、そのデータの抽出を容易にした。これにより、構築した本システムは12時間を超えるFBGの高速な反射波長測定が行なえることを示した。さらに、本システムはひずみにより発生するアラートの機能を実装し、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. FBG 測定システム

2.1 波長掃引レーザを用いたFBG測定システム

Fig. 1に光学系と測定系からなるFBGの反射波長測定システムを示す。波長掃引レーザ(SL)はファイバリング共振器型のファイバレーザであり、掃引周波数を f_m とした三角波波形により駆動され、発振波長を掃引している。SLの発振波長は波長1.55 μ m帯となっており、掃引帯域幅は約15 nmである²²⁾。

光学系は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が射出した光は光ファイバを伝搬し、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 λ_{Bk} ($k = 1 \sim 3$)はおおの1545, 1550, 1555 nmであり、反射率は約4%、半値幅は約0.1 nmである。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_k ($k = 1 \sim 3$)はおおの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 ΔX_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 ΔX_k μ m移動したとき、ひずみ $\Delta \varepsilon_k$ ($k = 1 \sim 3$)は $\Delta X_k / L_k$ となることから ΔX_k μ mに相当する。

測定系は、デジタル入出力ボード(DIO)とADコンバータ(ADC)を搭載したデータ集録装置(DAQ)、コンピュータ(PC)とデータベースにより構成している。DAQ(PXIe-1073,

Fig. 1 FBG measurement system

National Instruments)には検出器の信号、発振器(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(PXIe-6341, National Instruments)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(PXI-5105, National Instruments)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、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ない、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を用いて行なった。SQLiteはほか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、8 TByte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)を用いて行なっている。

実験はSLの掃引周波数 f_m を20 kHz、DAQのサンプリング周波数 f_s を40 MHzとし、複数のFBGの反射波長は測定周期 T_m ($= 1/f_m$)が50 μ sごとに実時間測定した。

2.2 FBGの反射波長測定方法

Fig. 2にFBGの反射波長測定の概略を示す。波長掃引は掃引周波数を f_m の三角波波形としたとき、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の反射波長を λ_{Bk} ($k = 1 \sim 3$)とすると、FBGの反射波長がレーザの発振波長と一致した時間にFBGの反射スペクトルが得られる。したがって、反射スペクトルの時間は順掃引において τ_{Fk} ($k = 1 \sim 3$)、逆掃引において τ_{Bk} ($k = 1 \sim 3$)となる。この反射スペクトルの時間はFBGの反射波長の値に依存して変化するため、反射波長を算出することができる。

ここで、反射スペクトルの時間から反射波長を算出するには、反射スペクトル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、FBG測定システムを用いて、FBGの反射スペクトルの時間を測定し、そのときの波長を波長モニタ(FB200, ANDO)により測定した。波長モニタ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

Fig. 2 Measurement method of FBGs

Fig. 3 Generation flow of alerts

型であり、波長分解能が 1 pm であり、測定波長帯域が 1527～1567 nm である。この実験により、測定した反射スペクトルの時間と波長の結果から換算式を算出した^{21), 22)}。FBG 測定システムは算出した換算式を組み込むことにより、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。

2.3 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、FBG 測定システムはアラート発生機能を実装した。Fig. 3 にアラート発生信号処理のフローを示す。FBG 測定システムは、1 s 間の測定データを用いて、アラート 1 (A_1) とアラート 2 (A_2) の 2 つのアラート処理を開始する。 A_1 はおのおのの FBG の反射波長の値 λ_{mk} ($k=1\sim3$) をしきい値 $\lambda_{th}^{(k)}$ ($k=1\sim3$) により判定している。 A_2 は各 FBG の反射波長の標準偏差の値 σ_{mk} ($k=1\sim3$) をしきい値 $\sigma_{th}^{(k)}$ ($k=1\sim3$) により判定している。2 つのアラート処理により、 $A_1^{(k)}$, $A_2^{(k)}$ ($k=1\sim3$) が 1 s ごとに発生する。FBG 測定システムは $A_1^{(k)}$, $A_2^{(k)}$ の論理和を取り、アラート信号 A_1 , A_2 を発生させている。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。

Fig. 4 Screen of FBG measurement system

2.4 FBG 測定システムのモニタ画面

FBG 測定システムはグラフィカルなプログラミング言語である LabVIEW (National Instruments) を用いて開発している。Fig. 4 に FBG 測定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なうことができる。表示部の上段では、各 FBG の反射波長の瞬時値 λ_{mk} , 1 s 間の平均値と標準偏差の値 σ_{mk} が表示されている。表示部の中段では各 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。表示部の下段では、ひずみにともないアラートが発生した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、FBG 測定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、FBG 測定システムは複数の FBG の反射波長を高速に測定することができる。

3. データ管理システム

3.1 データベースを用いたデータ管理システム

FBG 測定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。Fig. 5 にデータベースを用いたデータ管理の概略を示す。FBG の反射スペクトルは DAQ により取得され、PC のプロセッサにより処理される。プロセッサの出力は反射波長 λ_{mk} ($k=1\sim3$) ならびにアラート A_1 , A_2 となる。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を用いて、FBG 測定システムのセンサデータを管理している。このとき、FBG 測定システムからのセンサデータは 1 時間あたり約 2 GByte となっており、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、バルクインサート処理を導入している。

Fig. 5 Data management using database

Fig. 6 User interface of data management system

3.2 データ管理システムのユーザインターフェース

ここで、ユーザは Fig. 6 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、表示部の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。このとき、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。

4. 実験結果

4.1 静的ひずみ測定

まず、FBG に静的なひずみを印加したときの反射波長を FBG 測定システムにより測定した。ひずみは各 FBG に取り

Fig. 7 Reflection wavelength with static strain

付けた可動ステージ MS_k を ΔX_k 方向に $100 \mu\text{m}$ ごと増加させて印加した。Fig. 7 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 の反射波長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、FBG 測定システムは 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なうことができる。なお、最小 2 乗法により算出した反射波長の近似直線の傾きはおのおのの FBG において約 $1.2 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\text{m}$ となった。

4.2 高速振動測定

つぎに、FBG 測定システムにより振動測定を行なうため、各 FBG を共振周波数の異なる音叉 (共振周波数 $f_{Q1} = 415 \text{ Hz}$, $f_{Q2} = 440 \text{ Hz}$, $f_{Q3} = 445 \text{ Hz}$) の U 字部に固定し、FBG₁ に取り付けられた音叉から順次振動を印加した。Fig. 8 は音叉の振動による FBG の反射波長の応答波形であり、Fig. 8 (a), (b), (c) はそれぞれ FBG₁, FBG₂, FBG₃ 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、次第に減衰していることがわかる。また、図中の右上部には $t = 2 \sim 2.02 \text{ s}$ の時間領域を拡大した結果を表示している。各 FBG の反射波長の値が音叉の振動により周期的に応答するようすを、 $50 \mu\text{s}$ の測定時間分解能において高速に測定できていることがわかる。FBG₁ の反射波長を見ると、正弦波状に振動しており、変化幅は約 $3 \times 10^{-2} \text{ nm}$ となっている。なお、FBG 測定システムの反射波長の標準偏差はおのおのの FBG において $2 \times 10^{-3} \text{ nm}$ 以下であった。

4.3 高速かつ長時間の測定による瞬時的ひずみの検出

高速かつ長時間の測定において瞬時的なひずみの検出を行なうため、FBG 測定システムとデータ管理システムを組み合わせた本システムを用いて 14 時間連続して反射波長の測定を行なった。各 FBG 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 は移動量 ΔX_k を 50, 100, 150, 200, $250 \mu\text{m}$ とし、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

Fig. 8 High-speed vibration measurement

たとき、 MS_k は移動量 ΔX_k を 100, 200, 300 μm , 時間幅 T_p を 400 ms として駆動した。さらにこのとき、おのおのの FBG の 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た。アラート A_2 のしきい値 $\sigma_{th}^{(k)}$ は 5×10^{-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。Fig. 9 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。そこで、アラートが発生した時間情報から反射波長を抽出した。

Fig. 10 はアラートが発生している 3 時間経過した時間領域の反射波長を取得した結果である。Fig. 10 (a) はアラート A_1 , A_2 の結果、Fig. 10 (b), (c), (d) がそれぞれ FBG₁, FBG₂, FBG₃ の反射波長の結果である。おのおのの FBG

Fig. 9 Results of alert A_1 , A_2 for 14 hours

Fig. 10 Measurement results after 3 hours

において、瞬時的なひずみによる反射波長の変化が高速に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) の大きな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なえていることがわかる。

Fig. 11 はアラートが発生している 6 時間経過した時間領域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 FBG₁ 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 Fig. 10 のときとはほぼ同じであり、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 FBG 測定システムにより複数の 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

Fig. 11 Measurement results after 6 hours

がわかる。

5. ま と め

本論文では、波長掃引レーザによるFBGの反射波長測定システムと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、高速かつ長時間測定ができるシステムを構築した。本システムは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 μ 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 2×10^{-3} nm以下である。

また、データベースを用いることにより、12時間を超えるFBGの高速な反射波長測定が行なえることを示した。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は瞬時的なひずみや高速振動が発生した区間を検出できる。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。一方で、実際の構造物に応用するには、構造物に応じてFBGを設置した周囲環境の変化を考慮し、アラートのための最適なしきい値を決定する必要があるため、しきい値を任意に設定できるようにしている。

今後、本システムの波長掃引レーザのさらなる高速化と掃引波長の広帯域化を図ることにより、アコースティックエミッション(AE)波を測定できるように研究を進める。現在、石油タンクや地下貯蔵タンクなどにおいて、電気センサを用いた1~2時間の連続計測による損傷評価^{24)~26)}が行なわれており、このような危険区域のモニタリングなどに本システムが適用できるよう目指していく。

参 考 文 献

- 1) J.M. Lopez-Higuera (Ed.): *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, Wiley (2002)
- 2) S. Jang, H. Jo, S. Cho, K. Mechitov, J.A. Rice, S. Sim, H. Jung, C. Yun, B.F. Spencer and G. Agha: Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation, *Smart Struct. Syst.*, **6**-5-6, 439/459 (2010)
- 3) L. Jun: FBG application in bridge health monitoring system of Wuhan Yangtze River 2nd Bridge, *Proc. SPIE* 7503, 75035H (2009)
- 4) 水口, 水谷, 秋野, 武田, 筒井, 平野, 木本, 越岡: 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)
- 5) A. Othonos and K. Kalli: *Fiber Bragg Grating*, Artech House (1999)
- 6) A.D. Kersey, M.A. Davis, H.J. Patrick, M. Leblanc, K.P. Koo, C.G. Akins, M.A. Putnam and E.J. Friebele: Fiber Grating Sensors, *J. Lightwave Technol.*, **15**-8, 1442/1463 (1997)
- 7) 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 $\times$ 3 coupler, *Meas. Sci. Technol.*, **12**-7, 771/777 (2001)
- 8) Y. Shinoda, C. Katano, Y. Sakumoto and T. Higo: Fundamental Experiment of Differential Strain Gage using Fiber Bragg Gratings, *Proc. SICE Annual Conference* 2005, 1508/1511 (2005)
- 9) 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)
- 10) Y. Shinoda, I. Ogura, Y. Ono, S. Kaneko and T. Higo: 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)
- 11) C.G. Akins, M.A. Putnam and E.J. Friebele: Instrumentation for interrogating many-element fiber Bragg grating arrays, *Proc. SPIE* 2444, 257/266 (1995)
- 12) 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)
- 13) T. Saitoh, K. Nakamura, Y. Takahashi, H. Iida, Y. Iki and K. Miyagi: Ultra-Long-Distance Fiber Bragg Grating Sensor System, *IEEE Photonic. Tech. L.*, **19**-20, 1616/1618 (2007)
- 14) E.J. Jung, C. Kim, M.Y. Jeong, M.K. Kim, M.Y. Jeon, W. Jung and Z. Chen: Characterization of FBG sensor interrogation based on a FDML wavelength swept laser, *Opt. Express*, **16**-21, 16552/16560 (2008)
- 15) 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)
- 16) H. Tsuda, E. Sato, T. Nakajima, H. Nakamura, T. Arakawa, H. Shiono, M. Minato, H. Kurabayashi and A. Sato: Acoustic emission measurement using a strain-insensitive fiber Bragg grating sensor under varying load conditions, *Opt. Lett.*, **34**-19, 2942/2944 (2009)
- 17) G. Wild and H. Steven: Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state-of-the-art, *IEEE Sens. J.*, **8**-7, 1184/1193 (2008)

- 18) C. Jomdecha, A. Prateepasen and P. Kaewtrakulpong: Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types, *NDT E Int.*, **40**-8, 584/593 (2007)
- 19) 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)
- 20) 津田, 佐藤, 中島, 佐藤: 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)
- 21) 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)
- 22) T. Yamaguchi and Y. Shinoda: Development of fast FBG interrogator with wavelength-swept laser, *Proc. SPIE* 9506, 95061F (2015)
- 23) T. Yamaguchi and Y. Shinoda: High-speed and long-time FBG interrogation system using wavelength swept laser, *Proc. SPIE* 9525, 95252X (2015)
- 24) 山田, 橋川, 湯山, 神谷, 関根, 丸山: AE 法による石油タンクの腐食損傷評価, *圧力技術*, **40**-4, 50/55 (2002)
- 25) 前田, 橋本, 橋脇, 関根, 山田, 湯山: 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)
- 26) 川崎, 寺村, 伊津野, 岡田: AE 法による積層ゴム支承の損傷評価に関する実験的研究, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, **71**-2, 244/254 (2015)

=====

[著 者 紹 介]

山 口 達 也 (学生会員)

2015 年日本大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年日本大学大学院理工学研究科博士後期課程に入学, 現在に至る。光ファイバ計測, 実時間計測システム, 構造ヘルスマニタリングなどの研究に従事。電気学会, 日本保健科学学会, IEEE, SPIE の学生会員。

篠 田 之 孝 (正会員)

1989 年日本大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年同大学助手。専任講師, 准教授を経て 2012 年教授。現在に至る。博士 (工学)。2009 年米国バージニア工科大学客員研究員。レーザ計測, デジタル信号処理, 動作解析などの研究に従事。電気学会, 照明学会, 応用物理学会, IEEE, SPIE などの会員。

=====