

## OFDRを用いた長ゲージFBGによる分布計測の研究\*

(第1報, 光学シミュレーションモデルを用いた検討)

井川 寛隆<sup>\*1</sup>, 太田 圭一<sup>\*2</sup>, 葛西 時雄<sup>\*1</sup>山口 功<sup>\*1</sup>, 村山 英晶<sup>\*3</sup>, 影山 和郎<sup>\*3</sup>

## Distributed Measurements with a Long Gauge FBG Sensor

Using Optical Frequency Domain Reflectometry

(1st Report, System Investigation Using Optical Simulation Model)

Hirotaka IGAWA<sup>\*4</sup>, Keiichi OHTA, Tokio KASAI,

Isao YAMAGUCHI, Hideaki MURAYAMA and Kazuro KAGEYAMA

<sup>\*\*</sup> Japan Aerospace Exploration Agency,

6-13-1 Osawa, Mitaka-shi, Tokyo, 181-0015 Japan

Optical fiber sensors are used in order to monitor strain distribution of a structure, because they have many advantages for structural health monitoring. By using Fiber Bragg Grating (FBG) sensors with a general interrogation system e.g. Wavelength Division Multiplexing (WDM) makes it possible to measure only average strain within the gauge length. In addition, it is necessary to allocate enough numbers of FBG sensors for monitoring stress concentration overall. Therefore, it is expected to apply a distributed strain sensor with the higher spatial resolution and the longer sensing length to accurate and effective monitoring of stress concentration. We present a new strain measurement system with a long gauge FBG sensor based on Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR), which enables us to measure fully distributed strain at special high spatial resolution. In this paper, we describe the principle and optical simulation model of the proposed measurement system and show results of numerical calculations.

**Key Words:** Optical Fiber Sensor, Measurement of Strain Distribution, FBG, OFDR, Health Monitoring, Smart Structure

## 1. 緒 言

さまざまな機械構造物の高い安全性・信頼性を確保するため、構造ヘルスマニタリングに近年注目が集まっている。構造ヘルスマニタリングとは、運用状態・実働荷重の把握を通じて、構造物の健全性評価・余寿命の推定・メンテナンスの最適化・設計へのフィードバックを行い、構造物の信頼性を向上させるものである。また、不幸にして事故が起こってしまった場合の被害を最小限にするため、破壊状況の把握も構造ヘルスマニタリングには望まれている。このような構造ヘルスマニタリングに用いられるセンサシステムには、耐久性・信頼性・耐環境性・ネットワーク性が要求される。

一般的なひずみゲージ・加速度ピックアップを使用して、実運用時における構造物全体の挙動をモニタリングしようとする場合、膨大な配線の取り回し・重量増加が大きな問題となっていた。これに対し光ファイ

バセンサでは、広範囲の情報を一挙に取得することが可能である<sup>(1)</sup>。さらに、細径・軽量であることから、繊維強化複合材料などに直接埋め込んで構造と一体化させる試み<sup>(2)</sup>も多く行われている。加えて、電磁気的なノイズに強く、耐久性・耐食性に優れるなどの特徴を有している。これらの特徴を有する光ファイバセンサは、構造ヘルスマニタリングを実用化する際の多くの問題を打破し、構造全体の信頼性を大幅に向上させるものとなる。

光ファイバセンサの中で、特に注目されているのがファイバグレーティングを利用したセンサである。Fiber Bragg Grating (FBG: ファイバブラッググレーティング)センサは、ひずみまたは温度を精度よく測定できるセンサとして、さまざまな場面で活用されるようになってきている。一般に、FBGセンサによる測定は、FBGセンサ単体での単点測定、もしくは複数のFBGセンサを1本の光ファイバ上に複数配置して(多重化して)測定する準分布計測技術である。これまで、多重化した測定を行う場合には、あらかじめ波長帯域を各センサに割当てて使用する、Wavelength Division Multiplexing (WDM: 波長分割多重)という方式が用いられてきた。しかし近年、Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR: 光周波数領

\* 原稿受付 2006年3月20日。

<sup>\*1</sup> 正員, 宇宙航空研究開発機構(〒181-0015 三鷹市大沢6-13-1)。<sup>\*2</sup> 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8655 東京都文京区本郷7-3-1)。<sup>\*3</sup> 正員, 東京大学大学院工学系研究科。

E-mail: higawa@chofu.jaxa.jp

域りフレクトメトリ)という方式が注目を集めてきている<sup>(3)</sup>。OFDR を用いることにより、WDM に比べて10倍以上ものFBG センサを多重化できるためである<sup>(4)(5)</sup>。これらの方式で用いるFBG センサは一般的に5~25 mm 程度であり、そのゲージ内で発生した平均的なひずみや温度を、FBG センサを配置した離散的な箇所計測できる。しかし、構造物の破壊の原因となる応力集中や疲労き裂を、ひずみ分布として直接観測するのは困難である。

本研究では、比較的長いゲージ長を持つFBG に対して、OFDR 方式を適用することにより、FBG に沿ったひずみや温度を空間的に連続、かつ高い分解能で計測する手法<sup>(6)(7)</sup>を提案する。光ファイバを用いた分布計測技術としては、Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR)<sup>(8)</sup>や Brillouin Optical Correlation Domain Analysis (BOCDA)<sup>(9)</sup>が知られており、それぞれ約1 m と約1 cm の空間分解能が報告されている。これに対し、本計測手法は1 mm あるいはそれ以下の高い空間分解能を有する。本論文では、OFDR を用いた長ゲージFBG による分布計測法に対する体系化、およびシステム設計の基礎構築を目的として、光学シミュレーションモデルを作成し、測定システムの構成要素のパラメータが、測定結果に及ぼす影響を検討した結果について報告する。本計測手法は、温度計測や適切なトランスデューサを用いたさまざまな物理量の計測にも適用することができるが、本報ではひずみ計測に関して主に論じる。

2. OFDR を用いたひずみ分布計測の概要

2章では、最初にひずみ計測部に用いるFBG センサの原理を示し、その後、本研究で提案するOFDR を用いた長ゲージFBG によるひずみ分布計測法の概要について説明する。

2.1 FBG センサ FBG は、紫外線を用いて、光ファイバのコア中に回折格子を形成したものであり、

通信分野では、光フィルタとしての機能を持たせた光ファイバ型デバイスとして用いられている。回折格子を光ファイバ中に非破壊的に直接形成できるため、低損失・小型・高信頼性・伝送用光ファイバとの整合性など、多くの利点を有している。

図1に示すように、グレーティングの周期を  $\Lambda$ 、光ファイバの屈折率を  $n$  とすると、次の式を満たす波長(ブラッグ波長) $\lambda_B$  で強い反射が生じ、その他の波長では透過する。

$$\lambda_B = 2n\Lambda \dots \dots \dots (1)$$

屈折率  $n=1.45$  程度であるから、 $\lambda_B=1.55 \mu\text{m}$  とするためには  $\Lambda=0.53 \mu\text{m}$  程度になる。

式(1)のブラッグ波長  $\lambda_B$  は、屈折率  $n$  あるいはグレーティングの周期  $\Lambda$  の変化によってシフトする。つまり、グレーティングの存在する部分にひずみあるいは温度変化が与えられると  $\Lambda$  が変化し、ブラッグ波長  $\lambda_B$  がシフトすることになる。この仕組みによって、FBG をひずみと温度のセンサとして利用することができる。一般的には光源には広帯域の波長を出力できる光源を用い、FBG からの反射光波長のシフト量を計測する。これをひずみや温度に換算することが可能であるが、そのひずみや温度はセンサ内の平均的な値となる。

本研究では、100 mm 以上の長さを有するFBG をセンサ部として使用し、OFDR および新たなデータ解析手法を用いてFBG 上の任意位置での光反射特性を求めることにより、FBG 上で発生するひずみ・温度分布を計測する。

2.2 OFDR 系の反射特性 今回提案するOFDR を用いたひずみ分布計測法に用いられる光学系の概念図を図2に示す。光学系は、波長可変光源(Tunable Laser)、受光器(Detector)、全反射終端(R)、FBG センサ(FBG)から成る。全反射終端とFBG センサは干渉計を構成している。波長可変光源の波長を連続的に変化させ、各波長における反射光強度を受光器で計測

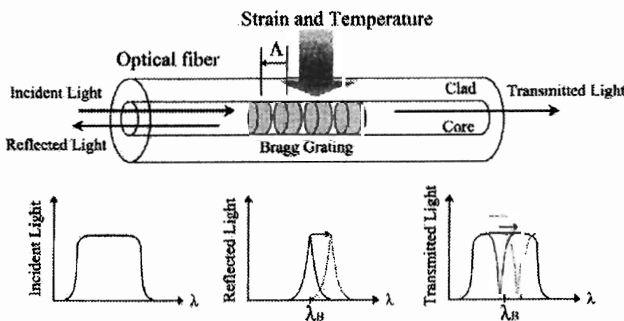


Fig. 1 Fiber Bragg Grating sensor

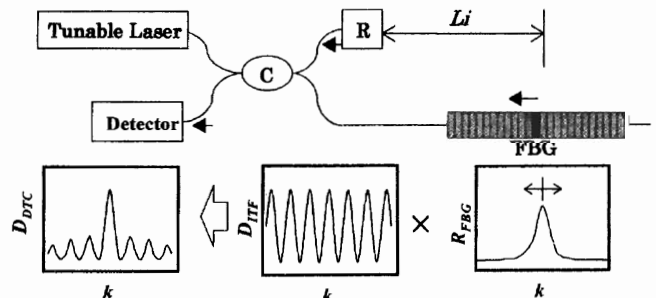


Fig. 2 Principle of OFDR sensor system

する。

FBG 上の微小区間からの反射光は、ある波長の光のみを強く反射するため、波長可変光源の光波数  $k$  とその反射光強度の関係は、図 2 下段右のような形となる。また、ピークを示す光波数  $k$  は、FBG 部でのひずみの大きさに依存して変化する。ここで、光波数  $k$  と波長  $\lambda$  は以下の関係を有する。

$$k = 2\pi/\lambda \dots\dots\dots (2)$$

論文中の定式化においては主に光波数を、計測・解析結果の表示には主に光波長を用いて記述している。

一方、FBG 微小区間からの反射光と全反射終端 R からの反射光は、光路差  $2nL_i$  を有する。詳細な解説・式導出は 3 章に行うが、これら二つの反射光は干渉を起こす。この干渉光強度の直流成分を除いた変動成分は、光波数  $k$  に依存して余弦関数的に変化し、以下のように表される。

$$\tilde{D}_{ITF} = A \cos(2nL_i k) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $n$  は光ファイバの屈折率を表す。

前述した二つの作用により、受光器で検出される光強度は図 2 下段左に示すように、光波数  $k$  に対してある周期とピークを持った形で変化する。つまり、次式のような形で表される。

$$\tilde{D}_{DTC} = R_{FBG}(k) \cos(2nL_i k) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $R_{FBG}(k)$  は FBG 内微小区間の反射特性を表

す光波数(波長)の関数である。この受光器で検出される信号の周期から行路差  $L_i$ 、つまり FBG 内微小区間の位置を、ピークを示す光波数  $k$  からひずみの値を計測することが可能となる。

ここまで、全反射終端 R からの光路距離が  $L_i$  の FBG 内微小区間の反射光について述べてきた。FBG 全体としては、光路差  $L_i$  つまり周期が異なる式(4)で表される波形の和として、光強度が観測されることとなる。

2.3 データ解析手法

2.2 節で述べたように、光源の波長(光波数)を掃引したとき受光器で観測される信号は、光路差つまり FBG の位置によって決定される周波数が異なる信号の重ね合わせである。この信号に対して、STFT (Short Time Fourier Transform : 短時間周波数解析) を応用したデータ解析を行い、簡便に各位置でのスペクトルを求めることができる。具体的に説明すると、ある光波長に着目して、それを中心として適切なウィンドウを施し信号データを抽出す。抽出した信号に対して FFT 解析すると、信号内に含まれる各周波数成分の強度が得られる。これは、着目した光波長における FBG 内各位置での反射強度に対応することとなる。着目した光波長を横軸の一点にとり、FFT 解析の周波数、すなわち光路距離を縦軸にとり、さらに FFT 解析で得られる各周波数の強度を色調で表現する。すべての波長帯域に対して、ウィンドウを移動させつつ同様の FFT 解析を行うと、横軸が光波長、縦軸が光路距離を表し、さらに色調が強度を表すスペクトログラムが得られる。このスペクトログラムは、各光波長に対する FBG 内任意位置での反射強度を示すこととなる。

ここで、具体的な計測例を示す。長さ約 100 mm の FBG を図 3 に示す形状の試験片の中央部に張り付け、引張試験を行った。同時に、リファレンスとしてひずみゲージを図 3 の P1~P4 の 4 箇所張り付けひずみ計測を行った。試験片はダンベル状に加工してあるため、FBG 内ではひずみが非一様に分布することになる。図 4 に引張荷重非作用時・作用時のスペクトログラム解析結果をそれぞれ示す。横軸が光波長、縦軸が位置を示している。各位置におけるスペクトルを一度に表示し、出力の大きさは色の濃さで表示している。試験において、反射光強度のサンプリングは光波数  $0.14 \text{ m}^{-1}$  間隔で実施した。光波数と光波長は式(2)の関係を有するので、サンプリング波長間隔は、計測する波長域に応じて若干変化することになるが、波長 1544 nm において  $0.053 \text{ pm}$  となる。また、FBG は 3.3 m に位置しており、式(4)の余弦関数成

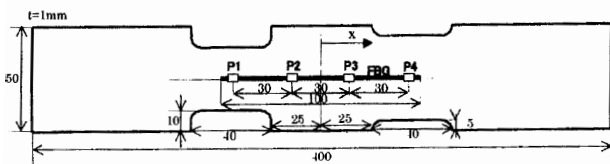


Fig. 3 Specimen of distributed measurement with a 100 mm FBG

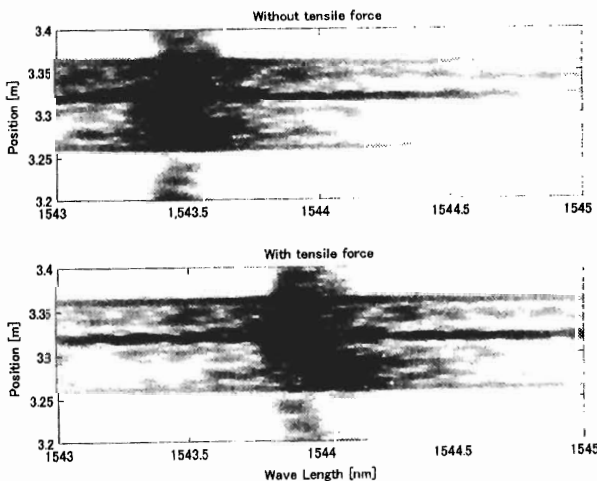


Fig. 4 Spectrogram of test measurement

分は光波数  $0.66 \text{ m}^{-1}$  (波長  $0.25 \text{ pm}$  相当) の周期を持つ。さらに、反射光の強度スペクトルの半値幅は約  $100 \text{ pm}$  であった。スペクトログラム解析においては、長さ  $4000$  (波長幅約  $210 \text{ pm}$  相当) のハニングウィンドウを用い、分解能を上げるために  $0$  パディングを行い、 $16384 (=2^{14})$  のデータで  $1$  ウィンドウ区間の FFT 解析を行った。また、ウィンドウの移動幅は  $20$  とした。この結果、スペクトログラムは波長  $1.1 \text{ pm}$  刻み、位置  $0.94 \text{ mm}$  刻みで得られた。ウィンドウ幅は、距離方向と波長方向の解像度に影響し、これらはトレードオフの関係にある。ここでは、ウィンドウ幅として実験のひずみ分布をほぼ正確に表すことができ、かつなるべく小さな値をとった。特に条件を示さない場合、本論文中のスペクトログラム解析はこれらのパラメータを用いて行った。

図4のスペクトログラムから、 $100 \text{ mm}$  の FBG 内任意点における反射光強度が最大となる波長を求めることが可能となる。二つのグラフを比べると、荷重を作用させた場合では、スペクトルのピークを示す光波長が、右方向にシフトしていることが観察される。これは、FBG に作用したひずみにより反射光波長が大きくなったことを示す。また、ひずみの大きくなる箇所では光波長のシフト量が大きくなっている。この反射光波長のシフト量をひずみに換算し、FBG 内任意点でのひずみを求めた結果を図5に示す。ただし、グラフ横軸である位置は、FBG の中央を原点として表している。丸印はひずみゲージを用いて同時に計測したひずみの値、破線は有限要素法を用いて解析を行った結果である。FBG によるひずみ分布計測結果は荷重に対する線形性を保ち、おおむね試験片のひずみ分布を計測できており、本計測手法の有効性が示されたといえる。

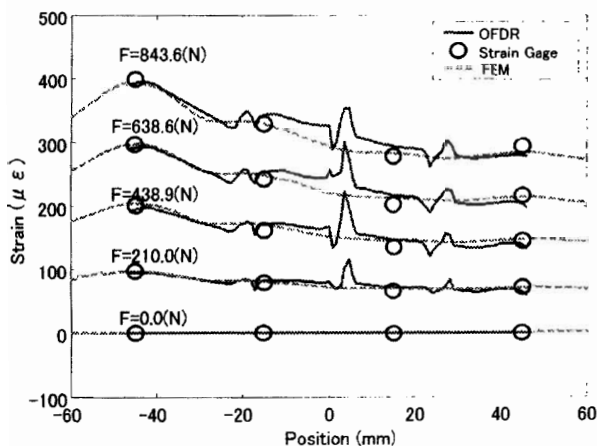


Fig. 5 Measurement of strain distribution with OFDR

ただし、図5の  $-20$ ,  $+5$ ,  $+25 \text{ mm}$  付近でひずみ計測値が大きく乱れているが、これらの箇所は、図4のスペクトログラム解析結果では  $3.285 \text{ m}$ ,  $3.310 \text{ m}$ ,  $3.330 \text{ m}$  の位置に対応し、荷重非作用時、作用時いずれにおいても、反射光強度が低下していることが確認できる。このため、ひずみによる光波長変化量が正確に計測できなかったものと考えられる。

ところで、この実験で使用した  $100 \text{ mm}$  の FBG は、製造する際に長さ約  $25 \text{ mm}$  のアポダイズ FBG を作るマスクを移動させ、4回書き込むことにより長さ  $100 \text{ mm}$  の FBG とした。アポダイズされた FBG では、一般的に両端における反射強度は低くなる。このため、ほぼ等間隔に現れる FBG マスクの境目で、反射強度が低下してしまったものと考えられる。このように、本システムを用いることにより FBG 製造時の不均一性なども観測でき、今後、長いゲージ長を有する FBG を製造する際の品質評価に使用することも可能であると考えられる。

### 3. シミュレーションモデルの構築・検証

3章では、本研究で用いた計測システムの構成について説明した後、理論式によるモデル化について述べる。さらに、シミュレーション結果と実験結果を比較することにより、シミュレーションモデルの妥当性を検証する。

**3.1 計測システム概要** 本研究で用いた光学系の構成を図6に示す。計測システムは、波長可変光源、パーソナルコンピュータ、A/Dコンバータ、受光器 D1, D2, 分光器 C1, C2, C3, 全反射終端 R1, R2, R3, そして FBG センサで構成されている。波長可変光源には安藤電気製の AQ4321A を使用した。A/Dコンバータには、ナショナルインスツルメンツ製の PCI-6115 を使用した。

波長可変光源から出た光は、分光器 C1 で二手に分けられる。分岐された光の一方は、D1, C2, R1, R2 で構成される干渉計に到達する。この光は、全反射終端 R1, R2 によって反射され、互いに干渉した光が受

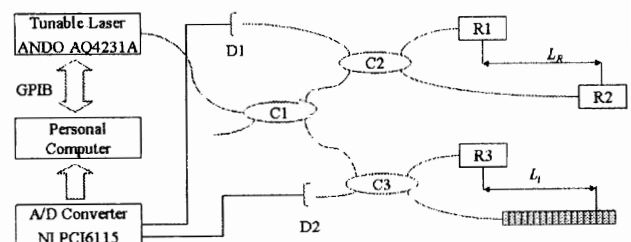


Fig. 6 Measurement system with OFDR

光器 D1 で計測される。同様にして, D2, C3, R3, FBG で構成される干渉計による干渉光強度も受光器 D2 で計測される。

受光器で取得された信号は, A/D コンバータを通じて電圧信号として PC に取り込まれる。3・2 節以降に説明するが, 受光器 D1 で計測される信号は, 一定の光波数間隔で変動する正弦関数である。したがって, ある出力値をしきい値とすると, 信号がしきい値を超えるタイミングでトリガをかけることにより, 受光器 D2 で検出される光強度信号を一定の光波数間隔でデジタルデータとして取得することが可能となる。この信号データに対して 2・3 節で説明したデータ解析を施して, FBG 内任意位置での反射特性を得る。

**3・2 測定システムモデル化** 最初に図 6 に示す D1, C2, R1, R2 で構成される干渉計のモデル化を行う。R1, R2 からの反射光  $LR_{R1}$ ,  $LR_{R2}$  は, 光波数  $k$  の関数としてそれぞれ以下のように表される。

$$LR_{R1} = e^{i(2nL_{R1}k + \pi)} \dots\dots\dots (5)$$

$$LR_{R2} = e^{i(2nL_{R2}k + \pi)} \dots\dots\dots (6)$$

ここで,  $n$  は光ファイバの屈折率,  $L_{R1}$ ,  $L_{R2}$  は受光器 D1 から全反射終端 R1, R2 までの距離を表し,  $L_R = L_{R2} - L_{R1}$  の関係を満たす。式(5), (6)を用いて, 受光器 D1 における光強度信号  $D_1$  を求めると, 光波数  $k$  の関数として以下のように表される。

$$D_1 = (LR_{R1} + LR_{R2})(LR_{R1} + LR_{R2})^* \dots\dots\dots (7)$$

$$= 2\{1 + \cos(2nL_R k)\} \dots\dots\dots (7)$$

式(7)からわかるとおり, 信号  $D_1$  は光波数(波長)を掃引したとき, 一定の光波数間隔で変動する正弦関数となる。この光波数間隔を  $\Delta k$  とすると,  $\Delta k$  は次式で計算される。

$$\Delta k = \frac{\pi}{nL_R} \dots\dots\dots (8)$$

この信号  $D_1$  を計測トリガとすることにより, 一定の光波数間隔  $\Delta k$  で信号のサンプリングが行えることとなる。

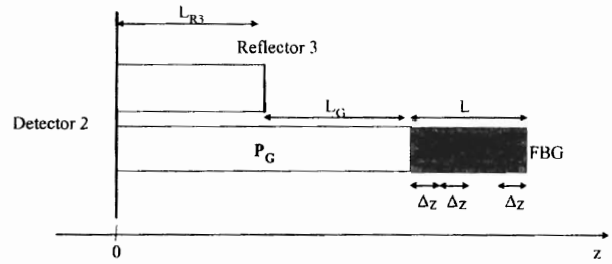


Fig. 7 Model of interferometer with FBG

次に, D2, C3, R3, ひずみ計測用 FBG で構成される干渉計のモデル化を行う。計測用 FBG を含む干渉計のモデル図を図 7 に示す。受光器 D2 で検出される信号  $D_2$  は, 式(7)と同様に以下のように表される。

$$D_2 = (LR_{R3} + LR_{FBG})(LR_{R3} + LR_{FBG})^* \dots\dots\dots (9)$$

全反射終端 R3 からの反射光  $LR_{R3}$  は, R1, R2 の場合と同様に以下の式で与えられる。

$$LR_{R3} = e^{i(2nL_{R3}k + \pi)} \dots\dots\dots (10)$$

計測用 FBG からの反射光  $LR_{FBG}$  に関しては, 伝達行列法を用いて定式化を行う<sup>(10)</sup>。これは, FBG を微小な反射特性が異なるグレーティング集合として取扱う方法である。ただし, 微小なグレーティングの内部では, 一様な反射特性を有するものとする。FBG を含む図 7 下側のファイバ系への光の入出力関数を伝達行列の形で表すと, 以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix}, \quad T = P_C \cdot F_1 \cdot F_2 \dots F_i \dots F_M \dots\dots\dots (11)$$

ここで  $R_0$ ,  $S_0$ ,  $R_M$ ,  $S_M$  はそれぞれ, グレーティングへの入射光, グレーティングからの反射光, グレーティングの透過光, グレーティングの向こう側からの入射光を表す。また,  $F_i$  は  $i$  番めのグレーティングのマトリックスであり,  $P_C$  は受光器からセンサ端までの位相シフトを示すマトリックスである。FBG の各区間の特性を表すマトリックス  $F_i$  は次式で求められる。

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\delta}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\delta}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

$\Delta z$  はグレーティングの分割長さである。  $\gamma_B$ ,  $\delta$ ,  $\kappa$  は, それぞれモード結合係数, 直流モード結合係数, 交流モード結合係数と呼ばれる。これらは, グレーティング間隔, FBG の屈折率変調幅などの  $i$  番めの区間の FBG 反射特性で決定される光波数(波長)の関数となるが, その詳細については参考文献(11)を参照されたい。また, 受光器から FBG までの光ファイバ部分を表す位相シフトマトリックス  $P_C$  は, 次式で与えられる。

$$P_C = \begin{bmatrix} e^{-in(L_{R3} + L_C)k} & 0 \\ 0 & e^{in(L_{R3} + L_C)k} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

式(11)に対して、境界条件として  $R_0=1, S_M=0$  を与えると、計測用FBGからの反射光  $LR_{\text{FBG}}$  は、マトリックス  $T$  の要素を用いて以下のように求まる。

$$LR_{\text{FBG}}=S_0=\frac{T_{21}}{T_{11}} \dots\dots\dots(14)$$

式(11)~(14)を用いて計測用FBGからの反射光を求め、式(9)、(10)を用いることにより、受光器D2で検出される信号  $D_2$  は求まる。以上の演算を式(8)で与えられる光波数間隔で計算することにより、本研究で用いる測定システムのモデル化が可能となる。

**3.3 シミュレーションモデルの検証** 3.2節のモデルに基づき、実装したシミュレーションの妥当性を検証する。まず、100 mmの長さのFBGに対して、ひずみや温度がゲージ内で一様な状態で実験を行い、同じ条件で行ったシミュレーションの結果との比較を行った。実験においては、外部からひずみや温度変化が加わらない状態に保持して、測定を行った。FBG

はポリスチレンの板に直線状に、テープで両端を軽く固定した。シミュレーションに用いたパラメータを以下に示す。

- ビジビリティ： $\nu=0.3944$
- FBGゲージ長： $L=100\text{ mm}$
- 有効屈折率： $n_{\text{eff}}=1.45$
- 設計中心波長： $\lambda_0=1548.16\text{ nm}$
- 平均屈折率変調： $\overline{\delta n_{\text{eff}}}=3.10 \times 10^{-6}$
- トリガ反射面間距離： $L_r=15.47\text{ m}$
- FBG配置位置： $L_c=4.96\text{ m}$

実験から得られた出力信号測定結果とシミュレーションの結果をそれぞれ図8に示す。なお、縦軸はそれぞれの出力値の最大値で正規化した。さらに、前述したデータ解析を適用し、各位置でのスペクトルを解析した結果を図9に示す。図8の実験結果の出力信号を見ると、最も大きなピークの左側に細かな信号が現れている。図9に示す実験結果のスペクトログラムからわかるように、実験に用いたFBGでは反射光波長、つまりグレーティング間隔の揺らぎがあったものと考えられる。シミュレーションでは、FBGセンサ内で設計中心波長を一定としているので、実験で現れた中心波長の揺らぎは出ていないが、その他の部分では、実験結果とシミュレーションは非常によく一致しているといえる。また、この実験で用いたFBGは、100 mmのアポダイズを施していない様なマスクを用いて製造されたものであり、図4に見られるような反射強度の不均一性は見られなかった。

次に、100 mmのFBG内の反射中心波長を、その中心でステップ状に0.2 nm変化させた場合について、シミュレーションを行った結果を図10に示す。反射

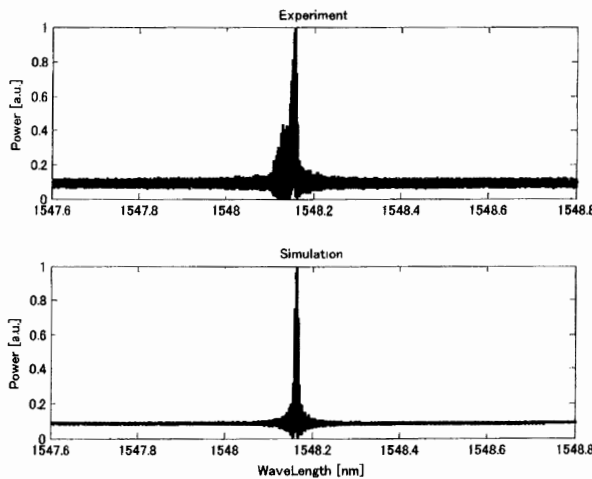


Fig. 8 Output signals of experiment and simulation

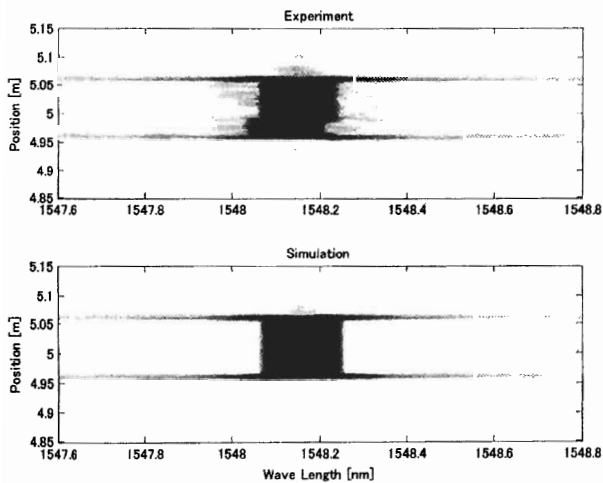


Fig. 9 Spectrograms of experiment and simulation with a 100 mm FBG

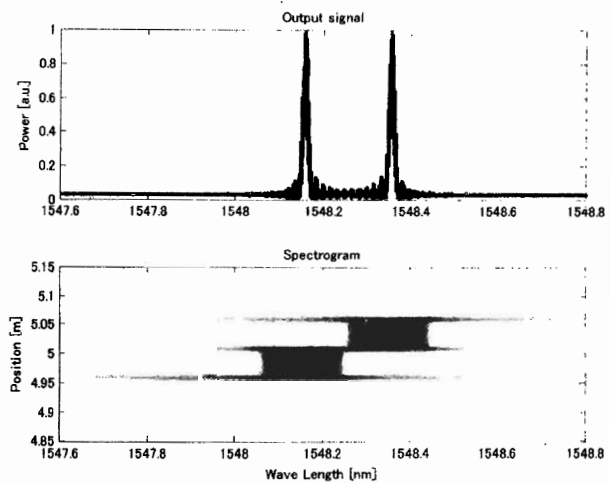


Fig. 10 Output signal and spectrogram of simulation with a non-uniform 100 mm FBG

中心波長以外の定数は、先ほどと同様の値を用いた。出力信号を見ると、二つのピークが0.2 nmの間隔で現れている。スペクトログラムを見ると、FBG 上中心位置で反射中心波長が変化していることも表現されている。ここでは、中心波長をFBG内でステップ状に変化させた場合のシミュレーション結果を示しているが、さらに詳細に中心波長を設定することにより、図8、9に示した実験結果を再現することも可能である。

以上、シミュレーション結果と実験結果の比較により、今回作成したシミュレーションソフトは、実験で使った100 mmのFBGの光学特性を非常によく模擬できており、妥当なものであることが確認された。また、局所的なひずみによりFBG内で反射中心波長が変化したケースのシミュレーションも、問題なく行えることが示された。これらより、今回提案する光学モデル・シミュレーションソフトの妥当性が検証された。

#### 4. シミュレーションモデルを用いた計測システム検討

3章で説明したシミュレーションソフトを用いることにより、計測システムのさまざまなパラメータが計測性能に与える影響を検討することが可能である。4章では、ウィンドウ長さが計測性能に与える影響および長ゲージFBGによる計測可能長さについて、検討を行った結果を示す。

##### 4.1 ウィンドウ長さが応答距離に与える影響

ここでは、測定性能をシミュレーションによって検討した代表例として、ウィンドウ長さが応答距離に及ぼ

す影響を示す。100 mmの長さのFBGを位置2 mに配置し、ゲージ中央で1000  $\mu\epsilon$ (波長変化1200 pm)のひずみをステップ状に与えた場合について、シミュレーションを行った。データ解析においては、ハニングウィンドウの長さを4000, 6000, 8000(波長幅約210 pm, 320 pm, 420 pm相当)と変化させた。それぞれのウィンドウで抜き出されたデータに0データを追加し、65536(=2<sup>16</sup>)のデータで1ウィンドウ区間のFFT計算を行い、ウィンドウの移動幅は20とした。この結果、スペクトログラムは波長1.1 pm刻み、位置0.24 mm刻みで得られた。それぞれのウィンドウ長さでのスペクトログラム解析結果を図11に示す。さらに、各位置での反射中心波長を半値中央値として求めた結果を、ゲージ中央部付近を拡大して図12に示した。

図12より、データ解析に用いるウィンドウ長さによって、ステップ状のひずみに対する応答の特性が異なることが確認できる。ステップ状のひずみ変化に対する、中心波長シフトの10%と90%の点の間隔を応答距離と定義すると、ウィンドウ長さを4000, 6000, 8000とした場合で、応答距離はそれぞれ1.6 mm, 1.1 mm, 0.6 mmとなった。ウィンドウ長さを大きくすることにより、スペクトログラムの距離方向の解像度が向上したため、応答距離の改善がなされたものと考えられる。

一方、ウィンドウ長さを大きくすると、スペクトログラムの波長方向の解像度は低下する。図11を見ると、ウィンドウ長さが大きくなるにつれ、スペクトルの幅が波長方向に広がっていることが確認できる。このとき、中心波長推定精度の低下が懸念される。中

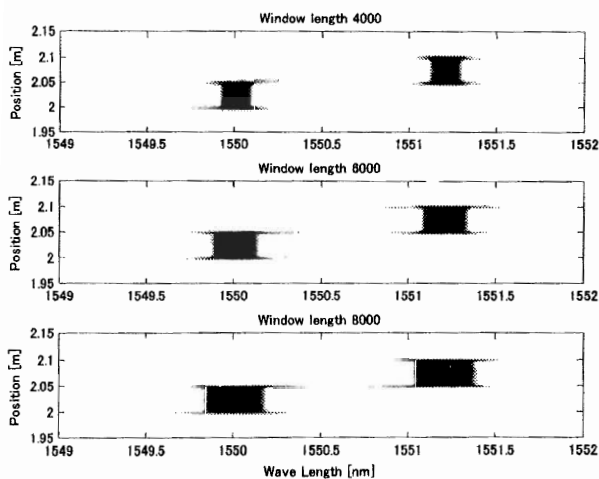


Fig. 11 Spectrograms of a non-uniform 100 mm FBG (window length=4 000, 6 000, 8 000)

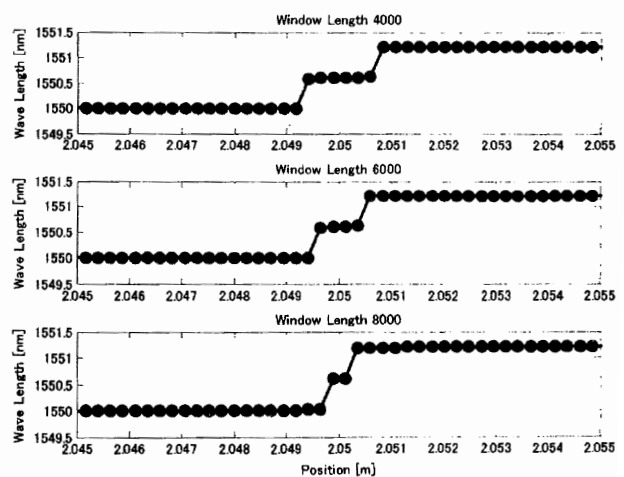


Fig. 12 Response distance of a non-uniform 100 mm FBG (window length=4 000, 6 000, 8 000)

心波長算出結果の設計中心波長に対する誤差の RMS 値を, FBG 中央部を除く 2.000~2.048 m および 2.052~2.100 m の区間で求めると, ウィンドウ長さを 4 000, 6 000, 8 000 とした場合にそれぞれ 0.28 pm, 0.30 pm, 0.27 pm となり, ウィンドウ長さによる大きな変化は見られない。つまり, ウィンドウ長さを大きくすることによって発生するスペクトログラムの波長方向の解像度低下は, 半値中央値から求められる反射中心波長の推定精度には, 直接的な影響は与えないことがわかった。

**4・2 測定可能長さの検討** ここまでの解析・実験においては, FBG の長さはすべて 100 mm としてきた。大規模な構造物で分布計測を行うには, さらに長い測定距離が必要となる場合がある。4・2 節では

FBG の長さを 20 倍の 2 000 mm としてシミュレーションを行った結果を示す。100 mm の FBG の場合と同様に平均屈折率変調を  $3.1 \times 10^{-6}$  として, FBG を 4 m から 6 m の位置に配置した場合について, シミュレーションを行った結果を図 13 に示す。左側のグラフが, 上述したデータ解析を適用して各位置でのスペクトルを解析した結果, 右のグラフが各位置でのスペクトルパワーの最大値を示している。スペクトログラムを見ると, 100 mm の FBG の場合と異なり, FBG を配置した 4 m から 6 m の範囲で反射光強度のピークが安定して現れない。これは, FBG の先端まで入射光が届いていないためと考えられる。さらに, FBG から直接反射される光と FBG 区内で複数回反射を起こした光が干渉することが考えられ, その光路差は

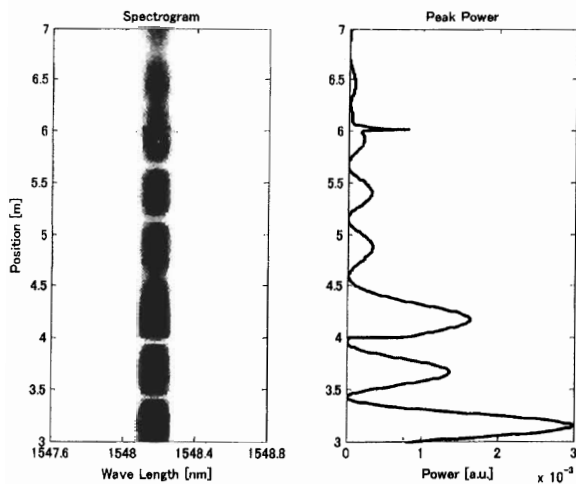


Fig. 13 Spectrogram and peak power of 2 000 mm FBG (average effective refractive index change =  $3.1 \times 10^{-6}$ )

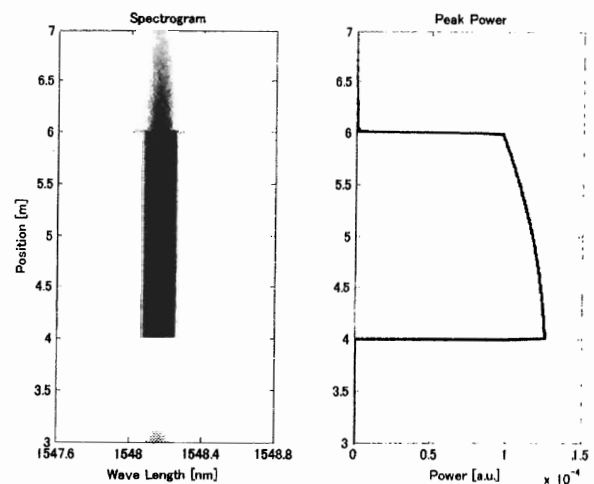


Fig. 15 Spectrogram and peak power of 2 000 mm FBG (average effective refractive index change =  $3.1 \times 10^{-7}$ )

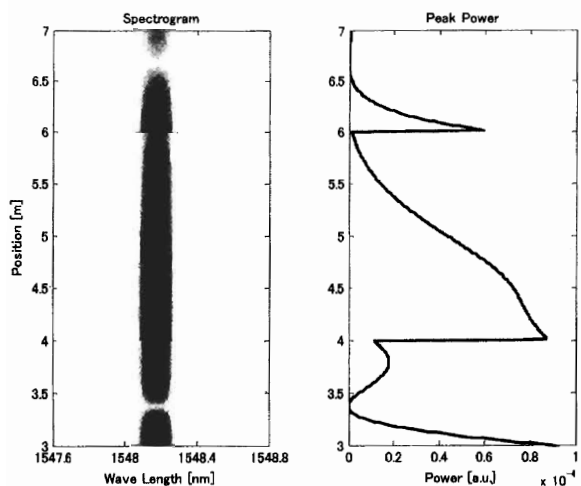


Fig. 14 Spectrogram and peak power of 2 000 mm FBG (average effective refractive index change =  $1.03 \times 10^{-6}$ )

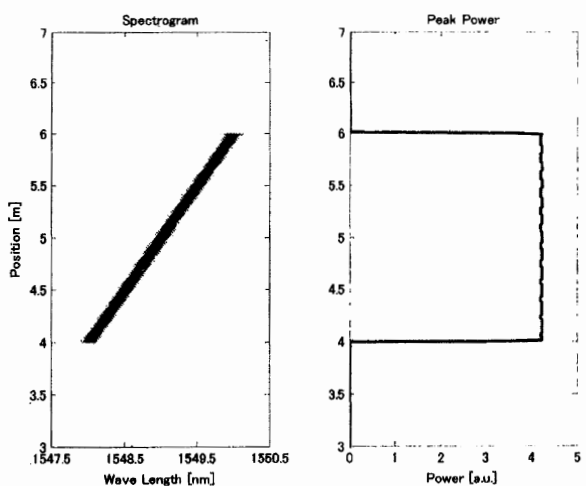


Fig. 16 Spectrogram and peak power of 2 000 mm chirped FBG (average effective refractive index change =  $3.1 \times 10^{-6}$ )



さまざまな値をとりうる。これ以外にもさまざまな組合せの干渉が考えられるが、複雑な干渉を行ったさまざまな光路差を持つ信号が、FBG を配置した 4 m から 6 m 以外の部分に現れているものと考えられる。

次に、平均屈折率変調を先ほどの 1/3 の  $1.03 \times 10^{-6}$ 、1/10 の  $3.1 \times 10^{-7}$  として、同様のシミュレーションを行った結果を図 14、15 にそれぞれ示す。平均屈折率変調を小さくすることにより、FBG が存在する 4 m から 6 m の区間で、安定した反射光強度が得られるようになる。2000 mm の FBG では、平均屈折率変調を  $3.1 \times 10^{-7}$  程度にすることにより、FBG 内全区間で計測を行うことが可能となる。FBG の平均屈折率変調を下げるということは、FBG 単位長さ当たりの反射率を下げることに同等である。

このほか計測区間を伸ばす方法として、チャープ FBG を用いることも考えられる。平均屈折率変調を図 13 と同様の  $3.1 \times 10^{-6}$ 、チャープレートを 0.005 nm/mm としたときのシミュレーション結果を図 16 に示す。チャープ FBG を用いると、各位置での反射中心波長が少しずつずれることになるので、FBG 内での減衰がそれぞれの波長で小さくなる。したがって、FBG 内任意点で強度が安定した反射光を観測でき、より長距離にわたって測定することが可能になるものと考えられる。

## 5. 結 言

長いゲージを持つ FBG に対して、OFDR 方式を適用することにより、FBG に沿ったひずみを空間的に連続かつ高い分解能で計測する手法を提案した。さらに、提案した計測システムに対して数値シミュレーションモデルを構築し、測定システムの構成要素のパラメータがひずみ計測に及ぼす影響を検討した。

その結果、今回提案する分布型光ファイバセンサは、従来のセンサを凌駕する空間分解能を持つことが証明された。さらに、本システムは波長可変光源を除いては、非常に簡素な光学デバイスにより構成されており、小型化などの実用化へのハードルは比較的低いものと

考える。また、本研究の実験で用いた FBG よりもさらに長いゲージ長を持つ FBG の製造が課題となるが、OFDR 方式の分布測定システムで FBG の品質も評価可能である。今後、さまざまな用途への適用が期待される、OFDR を用いたファイバグレーティングによる分布測定システムを設計・構築する際に、本研究の成果は広く利用することができる。

## 文 献

- (1) Murayama, H., *Structural Health monitoring with fiber-optic sensors*, Doctor Thesis, The University of Tokyo, (2001).
- (2) Takeda, S. et al., Detection of edge delamination in CFRP laminates under cyclic loading using small-diameter FBG sensors, *Composites Science and Technology*, Vol. 63 (2003), pp. 1885-1894.
- (3) Eickhoff, W. et al., Optical frequency domain Reflectometry in single-mode fiber, *Applied Physics Letters*, Vol. 39 (1981), pp. 693-695.
- (4) Childers, B. et al., Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four eight-meter optical fibers during static load tests of a composite structure, *Proceedings of SPIE*, Vol. 4332 (2001), pp. 133-142.
- (5) Froggatt, M. et al., Distributed measurement of static strain in an optical fiber with multiple Bragg gratings at nominally equal wavelengths, *Applied Optics*, Vol. 37, No. 10 (1998), pp. 1741-1746.
- (6) Igawa, H. et al., Measurements of strain distributions with a long gauge FBG sensor using optical frequency domain reflectometry, *Proceedings of SPIE*, Vol. 5855 (2005-5), pp. 547-550.
- (7) Ohta, K., *Distributed sensing with fiber grating based on optical frequency domain reflectometry*, Master's Thesis, The University of Tokyo, (2006).
- (8) Shimizu, K. et al., *J. Lightwave Technology*, Vol. 12, No. 5 (1994), pp. 730-736.
- (9) Hotake, K. and Tanaka, M., Distributed fiber Brillouin strain sensing with 1-cm spatial resolution by correlation-based continuous-wave technique, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, No. 2 (2002), pp. 179-181.
- (10) Yamada, M. et al., Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach, *Applied Optics*, Vol. 26 (1987), pp. 3474-3478.
- (11) Erdogan, T., Fiber Grating Spectra, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8 (1997), pp. 1277-1294.