FBGを用いた表面貼付型多点圧力センサの開発

— 第1報 圧力測定法とセンサ性能 —

学生員 若原 正人*
正員 深沢 塔一**

中島 円**

Development of an affix-type multipoint pressure sensor by use of FBG

— 1st Report: Pressure measurement system and the performance —

by Masahito Wakahara, *Student Member*
Toichi Fukasawa, *Member*

Madoka Nakajima

Summary

An affix-type multipoint pressure sensor was developed by using the Fiber Bragg Grating (FBG) technology. The FBG technology is commonly used in optical communications and is being applied to the stress/strain measurement of a large structure recently. In this paper, the developed pressure sensor by use of FBG and the pressure measurement system are described. The FBG pressure sensor can be stuck on the surface of a body on which pressures will be measured, and is capable of the temperature compensation by using an FBG temperature sensor. The material and diameter of the diaphragm of the sensor and the pre-tension of the fiber were determined according to the pressure measurement test under static pressures. Pressure distributions on a circular cylinder in uniform flow were measured in a circular water channel, where pressures were also measured by a conventional strain-gauge type pressure sensor. Comparing the measured pressures, performances of the FBG pressure sensor are discussed.

1. 緒言

流体中を移動する物体の表面圧力分布測定は、船舶、航空機、自動車等の研究・開発において欠かすことのできない技術である。現在主流となっている表面圧力測定方法は、測定対象の表面に圧力孔を開け表面にひずみゲージ型圧力センサを埋め込む方法や、チューブを介して圧力を測定する方法である。しかしながら、これらの手法では薄肉で複雑な形状の物体表面圧力分布は測定できず、また多点測定を実現するためには多数の圧力孔を開けてセンサを埋込む必要があり、その測定には多大な労力を要する。さらに、これらの圧力計は水や電気などの外乱の影響を受けやすく、温度の影響も無視できないなどの問題もあり、精度良く簡便に表面圧力を測定することは容易ではない。

本研究では、上記の問題を解決すべく、FBG (Fiber Bragg Gratings) 技術を用いた表面貼付型多点圧力センサの開発を行った。これまで、FBG 光ファイバを利用した圧力センサに関しては、ダイヤフラムのひずみ量を光の干渉現象を用いて計測する研究や¹⁾、2本のファイバ間の隙間距離の変化による光の変化を計測する研究^{2, 3)}などが行われている。また、FBG ファイバを用いたダイヤフラム型のロードセル・圧力センサも実用化されているが⁴⁾、これらの FBG

圧力センサは、ダイヤフラムのひずみ量測定手段をひずみゲージから FBG に置き換えたに過ぎず、長距離伝送や多点化など、FBG に置き換えたメリットはあるものの、センサの大きさや形状については従来のひずみゲージ式と大差はなく、依然として薄肉で複雑な形状物体の圧力分布測定には適用しがたいものである。

本研究では、特に薄肉形状物体の表面圧力分布測定を目指し、FBG 技術を用いた表面貼付型圧力センサの開発を行った。第1報では、FBG を用いた圧力測定原理を示し、圧力センサ仕様決定のための特性検証実験を行って、表面貼付型圧力センサを製作した。さらに、開発したセンサを用いた円柱模型の水槽試験結果より、センサの性能の検証を行った。

2. FBGファイバ

2.1 FBGファイバの構造

FBG ファイバの構造を Fig.1 に示す。光ファイバはコア部 ($\phi 10 \mu\text{m}$) とクラッド部 ($\phi 125 \mu\text{m}$) から構成されており、コア部はクラッド部よりも屈折率が高い。この屈折率の高い部分に図のように周期的な強弱を設けることで、ファイバ中を伝搬して行く光信号に対して、この周期に合致した波長の信号のみを反射させることができる。他の波長の信号はこの周期的屈折率変動 (屈折率の回折格子) を感知せず素通りしてしまう。この反射する信号の波長 λ_B は(1)式のように表すことができる。

* 金沢工業大学大学院 工学研究科 博士課程

** 金沢工業大学 機械系

原稿受理 平成 19 年 9 月 3 日

$$\lambda_B = 2n_0\Lambda \quad (1)$$

ここで n_0 は光ファイバの実効屈折率であり約 1.47 である。 Λ は屈折率変動の一周期の長さであるが、光信号の波長 λ_B はインターネット等の光通信で一般に 1550 nm であるので、屈折率変動 Λ の周期的な間隔は約 0.5 μm となる。通常 FBG のゲージ長さは 5~10 mm であるので、10 mm の FBG の場合、10 mm / 0.5 μm = 2 万個の Bragg Grating 格子が形成されることになる⁵⁾。

Fig.1 Structure of Fiber Bragg Gratings

2.2 FBGファイバの特徴

FBG ファイバはファイバの長さ方向に引張（圧縮）ひずみを与えると、FBG の格子周期 Λ も長く（短く）なるため、FBG のブラッグ波長も長波長（短波長）側にシフトする。この波長シフト量は光ファイバに加えられたひずみ量に比例するので、ブラッグ波長のシフト量 $\Delta\lambda_B$ を計測することにより FBG に加わるひずみ量を知ることができる⁶⁾。実際には、実効屈折率 n_0 もひずみ量 ε に依存するため、これを考慮すると、ブラッグ波長のシフト量は(2)式ようになる。

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_e)\varepsilon \quad (2)$$

ここで ρ_e は光ファイバの光弾性効果、すなわち応力による屈折率の変化の寄与を表す係数である。ブラッグ波長が 1550 nm の場合、波長シフトは 1.2 pm / μstrain 程度となる。

FBG ファイバの特徴として、ひずみ量の計測感度や分解能が高いため特定箇所のひずみ量を高精度に計測することができることが挙げられる。さらに高反射率を有するため信号強度が強いという特徴もあり、短い計測積算時間で十分な S/N 比が得られ、高速計測が可能となる。また FBG は約 0.01 nm/°C のわずかな温度依存性を有するため、FBG ファイバを温度センサとして併用することにより温度補償機能をもたせることができる。

3. FBGファイバを用いた圧力測定

3.1 圧力測定法

従来のセンシング分野において、FBG 技術は主にひずみゲージとして用いられてきた。その場合、Fig.2 の上図(a)に示すように、ファイバの AB 間が長さ方向に伸び縮みすることによってグレーティング部が変位し、ブラッグ波長がシフトすることを利用している。一方、本研究で開発している FBG 圧力センサは、従来のひずみセンサとは異なり、Fig.2 の下図(b)に示すように、ファイバの AB 間が圧力によってたわむことによってグレーティング部が変位し、ブラッグ波長がシフトする構造となっている。しかしながら、

FBG ファイバは非常に細いため、受圧面としては非常に小さく、測定物表面に FBG ファイバを設置するだけではグレーティング部を変位させるだけの十分な圧力を得ることができない。そこで、本センサでは、微弱な圧力を測定できるように、受圧面にフィルムを貼って、グレーティング部をダイヤフラム構造にした。

Fig.2 Pressure measurement system

3.2 センサ部の概要

FBG 圧力センサの概要を説明するため、Fig.3 に特性検証実験に使用したセンサを示す。中心に穴を開けた 1~2 mm のステンレス板をセンサベースとして用い、この穴の中心を通るように、ゲージ長さ 5 mm、外径 150 μm のポリイミド被覆タイプの FBG ファイバを配置した。その上から受圧面フィルムを貼り、これをダイヤフラムとするが、受圧面フィルムと FBG ファイバの間には、グレーティング部の中心に ϕ 150 μm のポリイミド製のスペーサを配置した。これは受圧面フィルムで受けた圧力を、Fig.2 のように、グレーティング部に集中荷重として与えるためである。これにより、フィルムとファイバの接触条件に伴うセンサの不安定性が回避できる。なお、スペーサを配置することで FBG ファイバには集中曲げ荷重が加わることで、これによる反射光スペクトルの乱れが懸念される。そのため、センサ作成時と圧力測定時にスペクトル測定を行い、スペクトル形状を確認したが、今回の測定範囲においては測定に支障をきたす程のスペクトルの乱れは発生していなかった。

FBG ファイバ、センサベース、受圧面フィルムはエポキシ系 UV 接着剤にて固定した。なお、特性検証実験では、センサ全体の剛性を高めるため、センサベースを 2 mm のアクリル板で補強した。

Fig.3 FBG sensor for verification

3.3 圧力測定システム

本研究では、光源およびブラッグ波長の測定装置として Micron Optics 社製の sm130⁷⁾ と si425⁸⁾ を使用した。光源からカプラを介して FBG ファイバに光が入射し、FBG で反射した光を波長スキャナにて観測する。無荷重時のブラッグ波長を初期値として加圧時のブラッグ波長との差からブラッグ波長のシフト量を求める。なお、圧力センサを実験模型に貼付して使用する場合は、事前、あるいは貼付後に、ブラッグ波長シフト量と圧力値の関係をキャリブレーションしておく必要がある。

4. センサ部特性検証実験

4.1 ダイアフラムの力学的特性

先に述べたように、FBG 圧力センサのダイアフラム部は、円形の受圧面フィルムが、スペーサを介して、FBG ファイバと接触している。受圧面フィルムを円形膜と考え、一様分布圧力 p が作用する場合、変形量 w は、薄板の微小変形理論に従えば、

$$w(r) = \frac{3pa^4(1-\nu^2)}{16Eh^3} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^2 \quad (3)$$

と与えられ、一方、膜理論に従えば、 σ を膜応力として、

$$w(r) = \frac{pa^2}{4\sigma h} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \quad (4)$$

となる^{9,10)}。ここで r は円形膜の中心を原点とした極座標の半径方向座標で、 a は円形膜の半径、 E , ν , h はそれぞれ円形膜のヤング率、ポアソン比、厚さである。なお、本センサは、圧力を直接受けるフィルムと、スペーサを介して荷重が伝わるファイバとで、外からの圧力を分担して受け持つ構造になっている。したがって、外圧が一定の場合、(3)、(4)式で与えられるフィルムの変形量が大きい方がひずみエネルギーが大きくなり、相対的に多くの荷重を分担することになるため、ファイバの荷重分担率が減少し、ファイバ出力が小さくなることに注意を要する。

4.2 検証実験方法

ここでは、FBG 圧力センサの基本仕様を定めるために、センサ部の特性に影響を及ぼすであろう以下の3つの条件を変化させ、これらがブラッグ波長のシフト特性および線形性に及ぼす影響について考察した。

- 受圧面フィルム材料
- ダイアフラム径
- ファイバ初期張力

基本仕様の検証方法を Fig.4 に示す。検証用 FBG 圧力センサを設置した金属プレートを水槽に沈め、水面からの高さを変化させることによる圧力センサのブラッグ波長のシフト変位量を FBG 測定器の sm130⁷⁾ で計測する。サンプリングスピードは 1000 Hz で、水深 25 mm 毎に 0.1 秒間測定しその平均値を求めた。

Fig.4 Schematic view of experimental apparatus

4.3 受圧面フィルム材料の影響

受圧面に使用した3種類のフィルムの材料特性を Table 1 に示す。フィルムはポリエステルとポリプロピレンの2種類のフィルム材料を使用し、ポリエステルに関してはフィルム厚が 25 μm と 50 μm の2種類について検証を行った。試験条件は、ダイアフラム径 6 mm とし、ファイバの初期張力を 0.40 N とした。

Table 1 Film characteristics

Film material	Thickness [μm]	Young's modulus [GPa]
Polyester (PE-25)	25	4.0
Polyester (PE-50)	50	4.0
Polypropylene (PP-50)	50	0.6

フィルム材料の影響による圧力と波長シフト量の関係を Fig.5 に示す。縦軸はブラッグ波長のシフト量、横軸は圧力値である。3回測定した結果をマークで示し、その平均値を近似直線で表した。

Fig.5 Effects of film material

まず、(3)式によれば、フィルムのヤング率の大きさに反比例してフィルムの変形量が小さくなり、したがってファ

イバの出力が大きくなることになるが、同じ厚みのポリエステル(PE-50)とポリプロピレン(PP-50)の結果を比較すると、ほぼヤング率の比に相当する出力の差が表れている。一方、フィルムの厚さの影響の度合いは(3)式と(4)式で異なるが、同じヤング率のポリエステルを比較すると、PE-50の出力が半分の厚みのPE-25の出力のほぼ倍になっていることをみると、フィルム厚さの影響は(4)式で与えられるようである。Fig.5より出力が大きく線形性に優れたフィルム材は、フィルム厚50 μm のポリエステル材(PE-50)であることがわかる。

4.4 ダイアフラム径の影響

ダイアフラム径を4 mm~12 mmまで2 mm間隔で変化させて実験を行った。試験条件は、受圧面にフィルム厚50 μm のポリエステル材を用い、初期張力を0.40 Nとした。

ダイアフラム径の影響による圧力と波長シフト量の関係をFig.6に示す。縦軸はブラック波長のシフト量、横軸は圧力値である。3回測定した結果をマークで示し、その平均値を近似直線で表した。

Fig.6 Effects of diaphragm diameter

(3)、(4)式より、一般にダイアフラム径が大きくなるとフィルムの変形量が大きくなり、ファイバに伝達される荷重は小さくなるが、一方、ダイアフラム径が大きくなるとフィルムが受けるトータル荷重は増加し、ファイバに伝達される荷重も大きくなる。ファイバの出力はこの2つの作用によってその大きさが変化するが、本ダイアフラムの場合、トータル荷重の大きさの方が支配的となり、Fig.6のように、ダイアフラム径が大きくなるとファイバの出力は増大する。しかしながら、ダイアフラム径が大きくなるにつれてフィルムの変形の影響が大きく現れ、出力の非線形性が強くなっている。なお、ダイアフラム径4 mmの場合は他に比べて出力が小さめになっているが、これはFBGファイバのゲージ長5 mmに対して受圧面の直径が4 mmと小さいため、グレーティング部全体が十分に変位できなかったためと考えられる。Fig.6より、ダイアフラム径については、FBGファイバのゲージ長よりも大きい範囲でなるべく小さい方(今回はφ6 mm)が出力特性に優れていることがわかる。

4.5 ファイバ初期張力の影響

FBGファイバに初期張力を与えることで低圧力域や低温

時におけるセンサの安定性を向上させることができることが知られている¹¹⁾。これは、ファイバに初期張力を与えずに両端を固定すると、ファイバにたるみが生じ、圧力の小さい間はファイバが変形してもひずみが生じないことが起こりうる。本研究では、初期張力がほとんどない場合(初期張力0.05 N)と、初期張力0.40 Nおよび0.80 Nの2種類をFBGファイバに与えた場合のブラック波長のシフト特性および線形性への影響を検討した。試験条件は、受圧面にフィルム厚50 μm のポリエステル材を用い、ダイアフラム径を6 mmとした。

ファイバ初期張力の影響による圧力と波長シフト量の関係をFig.7に示す。縦軸はブラック波長のシフト量、横軸は圧力値である。3回測定した結果をマークで示し、その平均値を近似直線で表した。

Fig.7 Effects of fiber pretension

図より、初期張力がほとんどない場合(0.05 N)に対し、初期張力をFBGファイバに与えることで、ファイバの曲げ剛性が上がるため出力は若干低下するものの、線形性がよく測定値のばらつきも抑えられることが確認できた。なお、初期張力0.40 Nと0.80 Nの応答特性に差がないことから、0.40 N程度の初期張力で十分な効果が得られるといえる。

5. 表面貼付型多点圧力センサ

5.1 センサの基本仕様

前述の検証結果から、ブラック波長のシフト特性と出力の線形性を考慮し、表面貼付型多点圧力センサで用いる基本仕様を以下のように定めた。

- (a) 受圧面フィルム材料：ポリエステル、厚さ：50 μm
- (b) ダイアフラム径：6 mm
- (c) ファイバ初期張力：0.40 N

なお、FBGファイバは、センサ部特性検証用FBG圧力センサに用いたものと同タイプを使用する。センサ構造をFig.8に示す。

本研究では、船舶の水槽試験における模型船の表面圧力測定を前提に圧力センサを開発したため、模型船の船首部のように局率が高い箇所への設置が容易に行える必要がある。そのためセンサ自身をポイント型化し、かつ抵抗を抑えるため薄型にした。図のように、ダイアフラムの固定部にリング型のステンレス製ベースを設置し、ベース層に

はエポキシ系 UV 接着剤を用いた。これより、センサ全体の厚さは 0.65 mm となった。なお、センサ裏面の粘着シートによって、測定物の測定したい表面に直接センサを貼り付けることができる。

Fig.8 FBG pressure sensor

Fig.9 Affix-type FBG multipoint pressure sensor

Fig.10 Pressure vs. Bragg wavelength

多点圧力測定を実施する場合は、Fig.9 に示すように、一本の光ファイバ上に圧力センサを直列に配置する。センサ間隔は任意に設置することができ、最小で 100 mm まで近接させることができる。また、センサは、最長で約 100 km まで延長することが可能である⁸⁾。このセンサの圧力応答特性を Fig.10 に示す。圧力 1000 mmAQ まで優れた直線性を有していることが分かる。

5.2 温度補償機能

FBG ファイバは、温度環境によっても波長がシフトするため、温度変化を伴う環境下での圧力測定では温度補正を行う必要が生ずる。本研究で温度補償に用いる FBG 温度センサの構造を Fig.11 に示すが、外圧の影響を受けず、温度変化のみによってブラッグ波長がシフトする構造になっている。温度補償用 FBG 温度センサは全長 20 mm の細いピン型形状をしており、FBG ファイバを外径 0.5 mm / 内径 0.2 mm のアルミパイプを通して外圧の影響を受けないようにし、初期張力 0.40 N を与えた状態で両端を UV 接着剤で固定する。このセンサを温度補正したい箇所に熱伝導性に優れたアルミテープと共に貼り付ける。温度補正は、(5)式に示すように、FBG 温度センサにより測定された波長シフト量 $\Delta \lambda_{BT}$ を FBG 圧力センサのブラッグ波長 λ_B から差し引くことによって行う。

$$\lambda'_B = \lambda_B - \Delta \lambda_{BT} \quad (5)$$

Fig.11 FBG temperature sensor

Fig.12 Temperature vs. Bragg wavelength

温度補償用 FBG 温度センサの温度特性を Fig.12 に示す。温度補償効果を確認するため、異なる水温の水槽を用いて検証実験を行った。実験の概要を Fig.13 に示す。金属製プレートに FBG 圧力センサと FBG 温度センサを同じ高さに設置し、水深 1000 mm まで沈め、圧力センサと温度センサのブラッグ波長を測定した。ブラッグ波長の水温による違いおよび温度補正後の結果を Fig.14 に示す。縦軸はブラッグ波長、横軸は圧力値である。水温が異なるとブラッグ波長も変位するが、圧力センサの出力を(5)式によって補正することで、温度変化が生じる環境下においても安定して圧力測定ができていることが確認できた。

Fig.13 Schematic view of experimental apparatus for temperature compensation

Fig.14 Bragg wavelength in different temperature

5.3 回流水槽実験

今回開発した表面貼付型多点圧力センサの性能を検証するため、1000×800 mmの測定部を持つ回流水槽を使用して、円柱表面の圧力測定を行った。実験の概要を Fig.15 に示す。

Fig.15 Schematic view of experimental apparatus in circular water channel and measurement points

外径 115 mm の円柱模型の水深 400～700 mm の位置に FBG 圧力センサと温度センサを設置した。また比較のため

水深 400mm の円柱模型表面に 0.45 mm の圧力孔を設け、ひずみゲージ式圧力センサ (GE Sensing PDCR4410) を用いて同時に圧力測定を行った。流速は 0.8 m/s と 1.0 m/s とし、FBG の測定には si425⁸⁾ を使用し、サンプリングスピードは 62.5 Hz で 1 分間圧力測定を行い、その平均値を求めた。実験では、円柱を回転させて設定角度を変えることにより圧力計測点の流れ方向に対する角度を変更した。なお、FBG 圧力センサの出力は、前述の FBG 温度センサの測定値を用いて温度補正を行った。

5.4 実験結果および考察

Figs.16, 17に、各流速における円柱表面の圧力係数を示す。縦軸に圧力係数 C_p 、横軸に圧力点の流れ方向に対する角度をとり、水深 400 mm の位置で測定した FBG 圧力センサの結果を (●)、その他の位置の結果を (○) でプロットした。また、ひずみゲージ式圧力センサの結果を (□) で、理論値を実線で示す。なお圧力係数は、0度におけるひずみゲージ式圧力センサの圧力係数が 1 となる速度を用いて、無次元化を行った。

Fig.16 Pressure coefficients of circular cylinder ($v=0.8\text{m/s}$)

Fig.17 Pressure coefficients of circular cylinder ($v=1.0\text{m/s}$)

図より、FBG 圧力センサの値は 0～45 度の位置においてひずみゲージ式圧力計の測定結果とほぼ一致しており、ばらつきも少ないことがわかる。一方、60 度より大きな角度になると FBG 圧力センサの値はひずみゲージ式センサの値より大きくなり、測定値のばらつきも大きくなる。これは圧力点の流れに対する角度が 60 度を超えると、FBG 圧力センサが存在することにより剥離が早まり、また FBG 圧力セ

ンサの下流にFBG温度センサを設置したことで剥離が促進されたためと考えられる。しかしながら、剥離点より前方の点での圧力値はFBG圧力センサとひずみゲージ式圧力センサでよく一致しており、時間平均値としてみると、FBG圧力センサの性能は少なくとも定常流場においては問題ないものと考えられる。なお、今後は非定常流場における検証も行っていく予定であるが、その場合、FBG測定器の高速化やFBG圧力センサの動特性についても検証を行う必要がある。

6. 結 言

本研究では、船舶の水槽試験における模型船の表面圧力測定するための圧力センサとして、FBGを用いた表面貼付型多点圧力センサを研究開発し、その性能について検討を行った。結論は以下のとおりである。

- (1) FBGファイバの高精度・高速計測という特性を生かし、簡易に物体表面の圧力が測定できる表面貼付型多点圧力センサを開発することができた。
- (2) 受圧面フィルムとしては、ヤング率が比較的高く、フィルム厚がある程度の厚さのあるものを用いることで、比較的大きな出力と線形応答性を得ることができる。本研究では、フィルム厚 50 μm のポリエステル材が適当であることが判明した。
- (3) ダイヤフラム径としては、なるべく小さい方が、出力は小さくなるものの、線形応答性を得ることができるが、径がFBGのゲージ長より小さくなると、グレーティング部が十分に変位することができず、出力がかなり小さくなる。本研究では、ダイヤフラム径 6 mm が適当であることが判明した。
- (4) FBGファイバに 0.40 N 程度の初期張力を与えることで、測定値のばらつきを抑え、線形応答性を得ることができる。
- (5) 特性検証試験により、FBG圧力センサのダイヤフラム仕様として、受圧面のフィルムにフィルム厚 50 μm のポリエステル材を使用し、6 mm のダイヤフラム径と 0.4 N のファイバ初期張力を用いれば、圧力変動範囲が 1000 mmAQ 程度までの優れた線形応答性を得ることがわかった。
- (6) FBG圧力センサとFBG温度センサを併用することで、温度補正機能をもたせることができたことがわかった。
- (7) 一様流中の円柱表面の圧力分布測定実験において、剥離点より前方の点での圧力は、FBG圧力センサとひずみゲージ式圧力センサでよく一致した。したがって、本研究で開発した表面貼付型多点圧力センサは、定常流場において問題なく使用できる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、多大なご助力を頂いた金沢工業大学 機械系教授 増山豊先生、金沢工業大学大学院 工学研究科 修士1年 沼田翔太氏に深く感謝を申し上げます。なお、本研究で使用したFBG測定器はMicron Optics社より技術協力していただきました。ここに謝意を表します。

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(課題番号 No.19656053) の援助を受けて実施したことを付記する。

参考文献

- 1) K.Totsu, et al., “Ultra-miniature fiber-optic pressure sensor using white light interferometry”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.15, No.1, (2005), pp.71-75.
- 2) Hai Xiao, “Self-Calibrated Interferometric /Intensity Based Fiber Optic Pressure Sensors”, Virginia Polytechnic Institute and State University, (2000).
- 3) J.S. Heo, J.J. Lee, D.S. Kwon, and Y.S. Yoon, “Design of TR-EFPI Fiber Optic Pressure Sensor for the Medical Application”, Int. J. Human- friendly Welfare Robotic Systems Vol.3 No.2, (2002), pp.2-7.
- 4) <http://smartfibres.com/Attachments/SmartCell.pdf>.
- 5) 財団法人 四国産業・技術振興センター：光通信波長多重用ファイバー型デバイスの開発，産業技術総合開発機構，(2002)，pp.1-6.
- 6) 森田和章，中村雅弘，香月史朗，桑本和博，岩野真一，古川敏宏，センシング用 FBG，昭和電線レビュー，Vol.54 No.2, (2004)，pp.19-20.
- 7) Micron Optics Inc., Optical Sensing Interrogator sm130, <<http://www.micronoptics.com/sm130.htm>>, (2008).
- 8) Micron Optics Inc., Optical Sensing Interrogator si425, <<http://www.micronoptics.com/si425.htm>>, (2008).
- 9) S.Timoshenko and S.Woinosky-Krieger, 長谷川節訳，板とシェルの理論，ブレイン図書，(1973).
- 10) R.Schellin, et al., “Measurement of the mechanical behavior of micromachined silicon and silicon-nitride membranes for microphones, pressure sensors and gas flow meters”, Sensors and Actuators A 41-42 (1994), pp. 287-292.
- 11) 出雲正樹，栗原和郎，光式圧力センサー，公開特許公報，公開 2002-98604, (2002)，pp.3-4.