

FBG センサを用いたひずみ計測用モジュールの開発

Development of a strain measurement module using FBG sensor

小野紘一*, 大島義信**, 杉浦邦征***

Koichi Ono, Yoshinobu Oshima, Kunitomo Sugiura

*Ph.D., 京都大学教授, 京都大学国際融合創造センター融合部門 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**工修, 博士後期課程学生, 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***Ph.D., 京都大学助教授, 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

This paper focuses on the module for strain measurement using FBG (Fiber Bragg Grating) sensor. H shaped aluminum plate is used as the base of this module, in the center of which FBG sensor protected by the plastic case is located. As well as temperature test, tension and bending test were carried out to evaluate the properties of this module. In addition, the light reflection spectra of Bragg Grating were evaluated by T-matrix method in order to estimate the strain distribution. As a result it is found that it may be used for the strain measurement but spectrum evaluation is needed for the accurate measurement.

Key Words: measurement, fiber optic sensor, FBG

キーワード: 計測, 光ファイバセンサ, FBG

1. はじめに

スマートセンサとして注目を浴びている光ファイバセンサは, 現在様々な分野への適用が始まっている¹⁾. 土木分野においては, コンクリートの温度測定やひずみ計測などが行われているが²⁾, 今なお開発段階である. 一般に光ファイバセンサは, ひずみ・温度・圧力・磁界・電界などの計測が可能であるが³⁾, これらのうちでひずみ計測を目的とするものは, 分布型と離散型の二つに大別することが可能である. 両者とも, 一本の光ファイバ上のひずみを計測することになるが, その測定距離は数キロメートルと長距離である^{4), 5), 6)}. また光ファイバという素材上, 非腐食かつ電氣的な影響を受けないという特徴を有している. 離散型のセンサの一つである FBG (Fiber Bragg Grating) センサは, 離散点での測定という制約を有するが, 測定精度は 4.0μ 程度と高く, 従来のひずみゲージのような扱いが可能である^{5), 6)}.

しかし, FBG センサをポリイミドコーティングなどの一次被覆のみで用いる場合, 取扱いには注意が必要である. なぜならシリカ素材である光ファイバは, ある曲率以上の曲げを受けると破断する上, FBG のセンサ部には紫外線照射による劣化も存在し脆弱なためである. 一般に光ファイバの強度はクラッド上に施された被覆に依存するが, 素線では 0.35 k N/mm^2 程度である⁵⁾. センサのない伝送部分にはナイロンやアクリルなどの保護被覆を施すことが可能だが, 感度確保のためセンサ部には施すことができず, センサ化により脆弱な部分を残すことになる.

よって本研究では, FBG センサ保護のためにアルミプレートを用いたひずみ計測用モジュールの開発と評価を行った. また FBG の反射スペクトルの解析に用いられる伝達マトリクス法⁹⁾を利用して, センサ部におけるひずみ分布の評価を数値実験により行った.

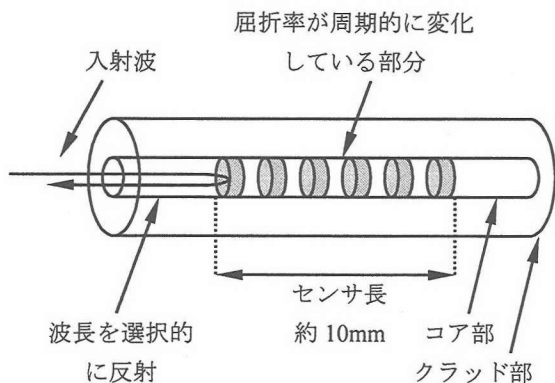


図-1 FBG センサ

2. FBG センサ⁵⁾

FBG (Fiber Bragg Grating) センサは、ファイバ上の特定の位置におけるひずみ量を計測するセンサである。ひずみを計測する部分はグレーティング部と呼ばれ、紫外線の照射により光ファイバの屈折率がある一定の間隔で変化している。図-1に模式図を示す。

光源から出力された光がグレーティング部に入射すると、グレーティング部分において特定の波長 (Bragg 波長) の光のみを選択的に反射し、それ以外の光は FBG を通過する。Bragg 波長 λ_B はコアの屈折率 n と格子の間隔 Λ により次式で表される。

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

また Bragg 波長 λ_B での反射率 R は、グレーティングの長さ L 、格子周期 Λ 、屈折率変化 Δn 、屈折率 n の関数として以下のように与えられる⁵⁾。

$$R = \tanh^2 \left\{ \pi \left(\frac{\Delta n}{2n} \right) \left(\frac{L}{\Lambda} \right) \right\} \quad (2)$$

式(2)からわかるように、高い反射率 (90%程度) を確保するためには、通常センサ長が 10mm は必要となる。土木計測の現場で用いられている FBG の計測方式 (主に Fabry Perot Tunable Filter 方式) では、一般に高い反射率が要求され、センサ長を 10mm 以下にすることが困難である。ただし、研究的に行われている他の測定方式によっては、反射率が低くても計測可能なものもあり、10mm 以下のセンサ長も採用可能である⁵⁾。

次にひずみ感度および温度感度であるが、式(1)からわかるように、検知すべき Bragg 波長は屈折率と格子周期の関数となっている。外力によるひずみが発生した場合、光弾性効果による屈折率変化および格子周期の変化が生じる。その結果 Bragg 波長がシフトし、そのシフト量から発生したひずみ量を検出することが可能である。一方温度変化が生じた場合、熱膨張による格子周期変化以外に、屈折率の変化が生じる。シリカガラスの熱膨張係数は小さいため ($0.5\mu\text{m}/^\circ\text{C}$)、後者が支配的となる。以上から外的要因 (発

生ひずみや温度変化) による波長シフト量は次式で表される⁵⁾。

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = S_\varepsilon \Delta \varepsilon + S_T \Delta T \quad (3)$$

ここで S_ε および S_T は、付録 A 式 (A-5) で定義される係数であり、それぞれ実験等のキャリブレーションにより決定される物理量である。過去の研究^{5),6)}から、波長 1550nm におけるひずみ感度は $0.7 \sim 0.8 \times 10^{-6}$ 程度、温度感度は $0.6 \sim 0.7 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 程度の値をとり、その波長依存性は低いことが知られている。よって以下代表値として $S_\varepsilon = 0.78$, $S_T = 0.67 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ を用いることにする。これより、FBG センサ自体のみかけの温度ひずみ、すなわち温度依存性は $0.67 \times 10^{-5} / 0.78 = 8.59 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ となる。センサの温度依存性は比較的大きく、しかもそのほとんどは屈折率変化によるものである。このことは、センサの機械的な膨張がなくともみかけのひずみが発生することを示唆している。よって土木構造物の現場計測など温度変化を受ける環境下では、ダミーゲージなどを用いた温度補償が必要である。温度補償の方法は数多く提案されているが、そのほとんどはダミーゲージ式である⁵⁾。本研究でも、提案したモジュールの温度感度が無視できないため (次章参照)、ダミーゲージを利用した温度補償方式を採用した。

一方、Bragg 波長の異なる FBG を直列に作成することで、1本のファイバ上での多点計測が可能となる。ただし波長分割方式による多重化 (WDM 方式) では、広域帯の波長から Bragg 波長を割り振ることになるので、センサ数が増せばその分一つのセンサの計測範囲も減少することになる。現状では、波長分割多重以外にも、光スイッチにより多岐の光ファイバを接続することで多重化を実現する方法や、時間分割多重 (TDM 方式) や光符号分割多重 (CDM 方式) などを利用して多重化を行っている例もある⁷⁾。

3. ひずみ計測用モジュール

3.1 モジュールの基本構造

ひずみ計測用モジュールは、鋼材などの構造部材のひずみ計測を長期で行う目的で開発された試作器である。モジュールの外観を図-2 に、また基本構造を図-3 に示す。モジュールの基本構造は、ベースである H 型のアルミプレート上に FBG センサを貼付した構造になっており、アルミプレートを鋼板にボルト止めし計測を行う。またグレーティング部の定着は、接着剤 (エポテック 353ND) により行っており、プレート全体をプラスチックで覆うことにより保護されている。またセンサ部以外のファイバについては、ナイロン被覆により保護されており、FC 型コネクタにより伝送用ファイバと接続することが可能である。

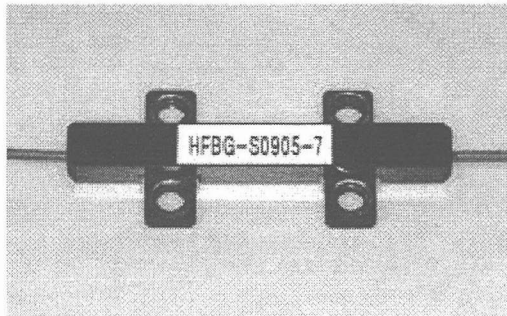
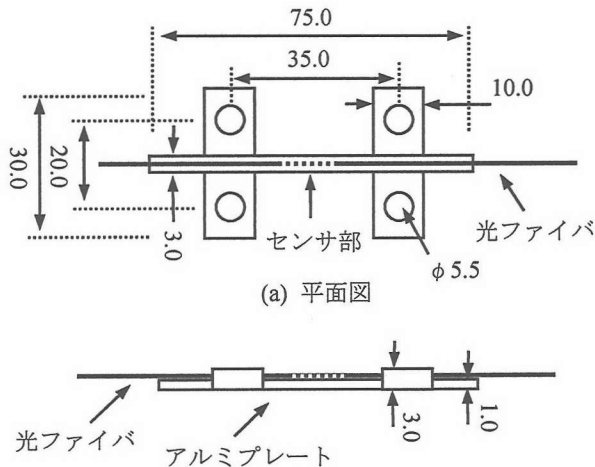


図-2 モジュールの外観（保護カバーあり）



(b) 側面図 単位 mm

図-3 モジュールの基本構造（保護カバーなし）

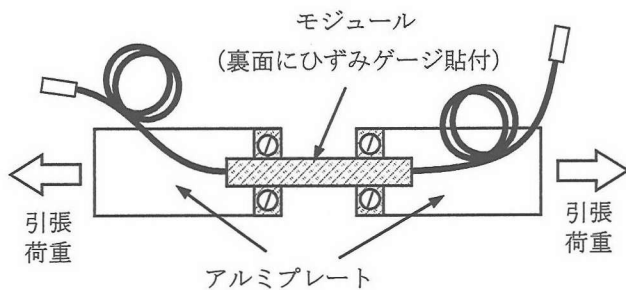


図-4 引張試験概要

3.2 引張試験

(1) 概要

モジュールの引張荷重に対するひずみ特性を検討するため、引張試験を行った。図-4に示すように、2枚のアルミ板をボルトにより取り付けたモジュールに対し、万能試験機により引張荷重を与えた。まず比較的大きなひずみに対する特性を検討するため、荷重を 50.0kgf (490.0N) まで与え、その後除荷した。ひずみ計測は 10.0kgf (98.0N) 毎に行った。次に低荷重レベルでの線形特性や復元特性を確認するため、荷重を 10.0kgf (98.0N) まで与えた後除荷し、載荷除荷ともにひずみ計測を 2kgf (19.6N) 毎に行っ

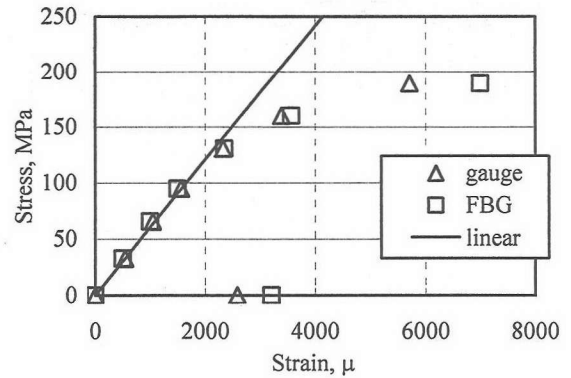


図-5 引張試験における荷重とひずみ量の関係

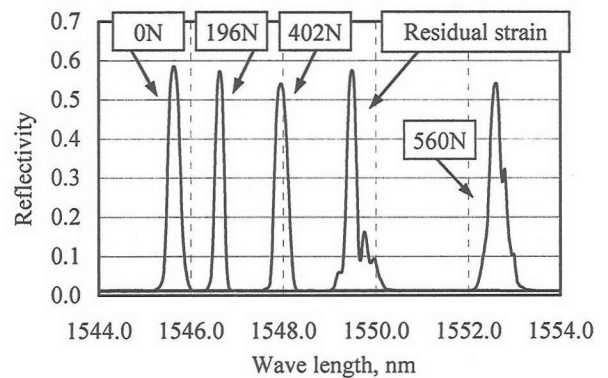


図-6 反射波長のスペクトル

た。FBG 計測での光源は ASE 光源を用いた。またいずれの実験でも、ひずみゲージをモジュール裏面に貼付し、ゲージによる計測も行った。

(2) 実験結果

以下引張応力とは、引張荷重をモジュールセンサ部の断面積で割ったものを指す。図-5に、引張応力に対する Bragg 波長シフトのひずみ換算値とゲージによるひずみの関係を示す。図から、引張荷重 300N により発生する応力が約 95MPa までは、両者とも線形関係にあることがわかる。しかし応力が約 130MPa を上回ると非線形となり、ベースのアルミニウムが非線形化したものと考えられる。その後、Bragg 波長による換算ひずみとゲージによるひずみとの乖離が生じており、荷重が大きくなるにつれてその差も大きくなっている。また残留ひずみについても差が生じている。引張試験用の定着用アルミプレートとモジュールは、片側のボルト締めのみで結合しているため、高い荷重レベルで曲げが発生したと考えられる。また曲げの方向は図-3(b)において上向きに凸であると考えられ、このような曲げが発生した場合、断面内に曲げが発生し、上面に貼付した FBG と下面に貼付したひずみゲージの測定値に開きが発生する可能性がある。

他方、図-6に本実験での反射波長のスペクトルを示す。一般に Bragg 波長の計測において、センサ部のひずみ分布

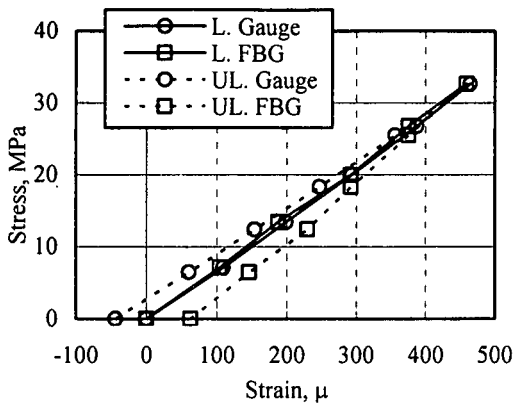


図-7 低荷重レベルでの応力ひずみ関係

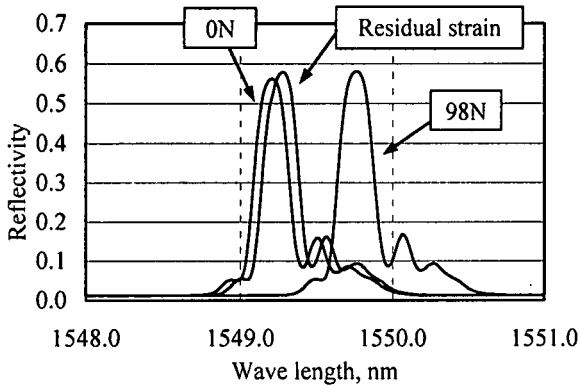


図-8 低荷重レベルでの反射波長スペクトル

が均一でない場合、反射波長のスペクトルが分裂し測定誤差を生じる可能性がある。低荷重時に比べ、560Nにおけるスペクトルでは、ピークに若干の分裂が生じていることがわかる。また残留ひずみのスペクトルにおいてもピークの分裂が生じており、センサ方向のひずみ分布が一定でないことを示唆している。この点については次章で数値解析を用いた詳細な検討を行うが、ひずみの変化量が小さい場合、ピーク波長はひずみ分布の平均値を示していると考えられる。

次に、低荷重レベル（98Nまで）における引張試験結果を示す。ただしこの試験は、上記の高荷重レベルでの引張試験後に行っているため、ベースのアルミニウムが塑性変形した状態で載荷を開始している。そのため反射波長のスペクトルには、不均一な変形の履歴が反映されている。

図-7は、載荷時および除荷時における応力とひずみの関係である。図中L.(Loading)は載荷を、UL.(Unloading)は除荷を意味する。載荷時における応力-ひずみ関係は、ひずみゲージおよびFBGともによく一致し線形である。しかし除荷の場合、ひずみゲージの値はFBGよりも大きく、さらに応力-ひずみ曲線の傾きは載荷時よりも小さくなっている。FBGに関しては、応力-ひずみ曲線の傾きが載荷時よりも大きくなっている。これは、高レベルでの試験によって生じた残留変形が、除荷の際に変化したためと考えられる。また載荷時の応力ひずみ関係から得られた弾性係数は、66.3GPaであった。これは一般の耐食アルミニウム

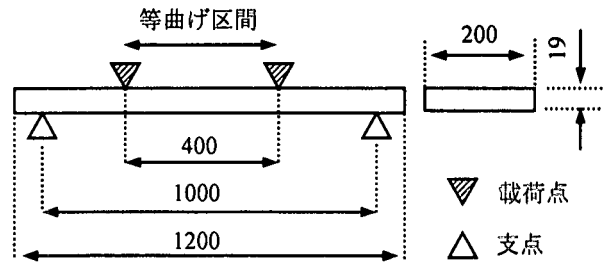


図-9 曲げ試験に用いた鋼板の寸法および載荷位置(単位 mm)

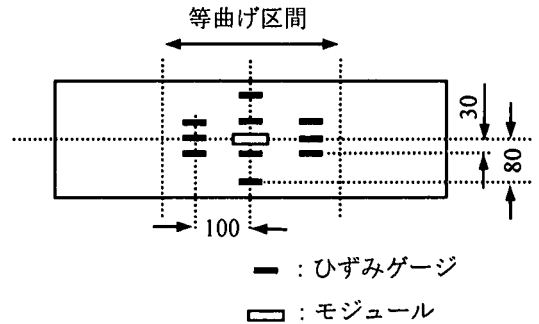


図-10 モジュールおよびゲージ位置(単位 mm)

の弾性係数 72.0GPa に近い値である。

また図-8は、載荷開始と最大荷重時および載荷終了時のスペクトルである。これらのスペクトルの形状はほぼ相似であり、中心波長のシフトのみが生じていることがわかる。ただし厳密には無載荷時のひずみ分布の形状は、載荷時と相似ではなく、載荷・除荷時に若干の付加曲げが作用したためと考えられる。

センサとしての使用上、線形範囲内での利用を前提とすれば、2000μ程度までの使用が可能であるといえる。ただし光ファイバそのものは、破断までほぼ線形挙動を示すことが知られている⁵⁾。またピーク波長として発現するひずみの値は、不均一なひずみ分布の場合、ひずみの変化量が小さいならば、ほぼひずみ分布の平均値となる。しかしひずみの変化量大きい場合、ひずみの平均値よりもシフトした波長にピークが移動してしまうため、誤差の発生する可能性がある。すなわち、本モジュールの設置や計測に対して、センサ部のひずみ分布が不均一となるような変形を生じさせないよう留意する必要があると言える。

3.3 曲げ試験

(1) 概要

図-9に示すように、中央部にモジュールを設置した鋼板に対し4点載荷曲げ試験を行った。図-10にゲージ位置およびモジュールの設置位置を示す。この試験におけるゲージの値は、等曲げ区間に貼付された10個のひずみゲージの平均値を用いた。鋼材が弾性範囲内となるよう降伏荷重の約50%程度まで載荷し、その後除荷した。またFBG計測に用いた光源はASE光源である。

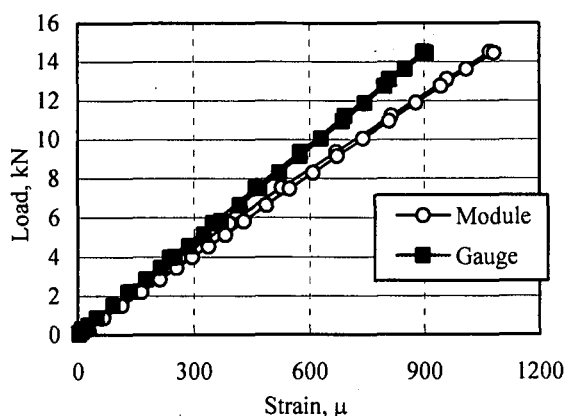


図-11 曲げ試験における荷重ひずみ関係

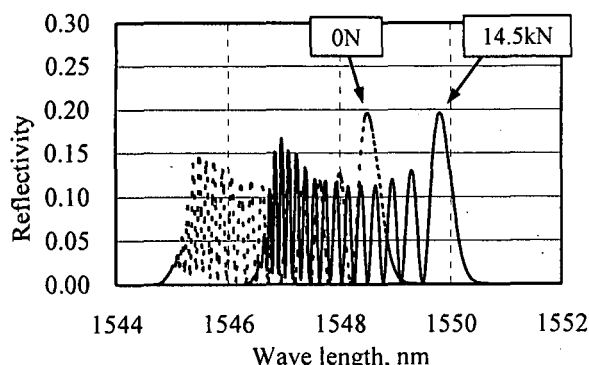


図-12 曲げ試験における反射光スペクトル

(2) 結果

図-11 に、ひずみゲージおよびモジュールにおける荷重ひずみ関係を示す。ゲージおよびモジュールの双方について、載荷除荷ともにほぼ線形関係にあった。いま、モジュール設置による剛性変化を無視し完全接着を仮定すれば、モジュールおよび鋼材の厚さがそれぞれ 1mm および 19mm であるので、モジュール位置でのひずみ量は理論上 $(9.5 + 1.0)/9.5 = 1.11$ 倍となる。しかし図の荷重ひずみ曲線を一次近似した直線の傾きから、実験におけるモジュールのひずみ量は、ひずみゲージのひずみ量に対して 1.19 倍になっていることがわかる。これは、モジュールと鋼材とはボルト締めにより結合されているため、完全接着になっていないためであると考えられる。センサの性質上、ボルト締めによる接合では、ネジ孔加工等のガタ量が不確定要因となるため、校正係数などによる修正は困難である。この点については、溶接による定着などの改善策が必要である。

図-12 には、本実験での載荷開始時と最大荷重時の反射波長スペクトルを示す。無載荷の波長が引張試験および温度試験のものとなるが、それは載荷時の温度が異なることに由来する。図のスペクトル群が極端に分裂しているのは、使用性確認のため行った実験で過度にモジュールを曲げ変形させてしまい、不均一な残留ひずみが生じた状態で実験を行ったためである。また反射率が低くなっている

のは、格子周期が均一である部分の長さが小さくなり、全体として低い反射率しか発現できなくなったためである。図から、スペクトルピークが複数になったものの、二つのスペクトルはほぼ相似であり、ひずみが均一に発生していることがわかる。またこのようにスペクトルが分裂した状態でも、各ピークのシフト量を検知すれば、ひずみと波長シフトが線形関係にあることがわかった。

以上より、曲げによるひずみ計測において、鋼材表面のひずみ量とモジュールによるひずみ量には一定の関係が示されたものの、校正係数では解消できない不確定要因が介在しており、曲げによるひずみ計測における本モジュールの適用性改善を検討する必要がある。

3.4 温度特性試験

(1) 概要

モジュールの温度特性を評価するために、温度特性試験を行い、FBG の測定波長と温度との関係を求めた。設定した温度は、17℃、30℃、50℃、70℃である。また温度特性試験は、環境試験機により無載荷の状態で行った。

(2) 結果

図-13 に、ピーク波長と温度の関係を示す。温度変化に対するピークシフト量は、ほぼ線形の関係にあることがわかる。また図より、一次近似による温度感度は $0.0224\text{nm}/^\circ\text{C}$ となった。よって温度変化によるみかけのひずみ量は、式(3)より、

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda S_\varepsilon} = \frac{0.0224}{1530 \times 0.78} = 18.77 \mu/^\circ\text{C} \quad (4)$$

となる。ただし、温度感度の適用範囲が -20°C から 80°C であるため、適用範囲の中心温度である 50°C に対応する波長 1530nm を代表値として利用した。一方、線膨張係数 α_H であるホストに FBG を貼付した場合の温度感度式(付録参照)から、みかけのひずみ量は、

$$\Delta\varepsilon = \left[\alpha_H - \alpha_F + \frac{S_T}{S_\varepsilon} \right] \Delta T \quad (5)$$

で表される。今、波長帯 1550nm 付近における各係数を $S_T = 6.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、 $S_\varepsilon = 0.78 \times 10^{-6}$ 、 $\alpha_F = 0.5 \mu/^\circ\text{C}$ とすれば⁵⁾、式(5)より、

$$\alpha_H = 18.77 - 8.59 + 0.5 = 10.69 \mu/^\circ\text{C} \quad (6)$$

となる。一方、材料試験によるアルミベースの線膨張係数は $11.8 \mu/^\circ\text{C}$ であり、式(6)による値とほぼ一致している。表面処理していないアルミ素材の線膨張係数は約 $23.1 \mu/^\circ\text{C}$ であるが、本モジュールに使用しているアルミは表面をアルマイト処理しており、線膨張係数に違いが生じたと考えられる。

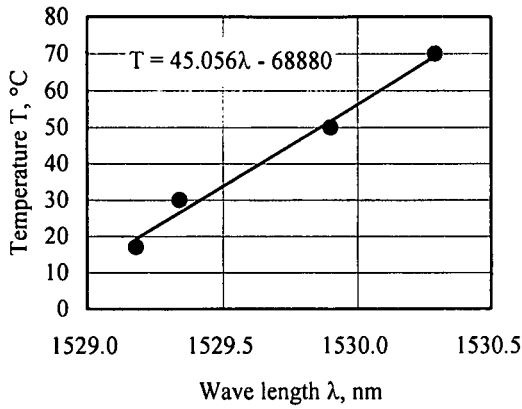


図-13 モジュールの温度感度

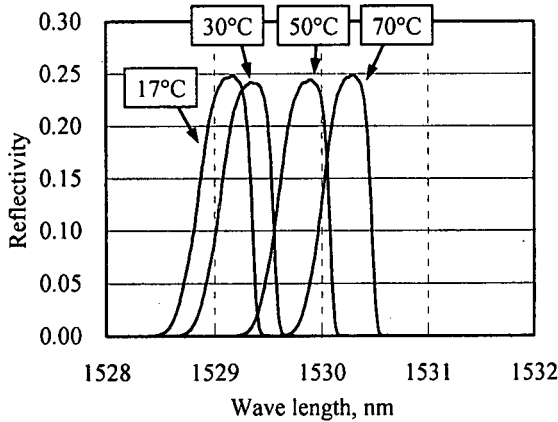


図-14 温度特性試験におけるスペクトル

次に各段階でのスペクトルを図-14に示す。各段階でのスペクトルピークは明確であり、ほぼ相似形である。またピークが明確であるため、スペクトル分布およびスペクトル幅も小さくなっている。これは、温度ひずみが均一に生じていることを意味しており、熱膨張による異常な変形等は生じていないといえる。ただし、温度特性試験に用いたモジュールは、曲げ試験に用いたモジュールとは異なり、試験前に過度な曲げや引張試験を行っていないため、初期状態においてピーク形状が明確である。

以上の実験により、モジュールの温度感度 $18.77 \mu\text{°C}$ が得られたが、その値は大きく、屋外などの温度変化の大きい場所で計測を行う場合温度補償が不可欠であると結論付けられる。

4. 伝達マトリクス法によるスペクトル解析

4.1 FBG における伝達マトリクスの構成

FBG の反射スペクトル特性の算定には、光のモード結合方程式および境界条件から得られる伝達マトリクスが用いられる¹⁰⁾。これは、グレーティング部の格子周期が一定でない場合に用いられる方法であり、グレーティング部を格子周期が一定と見なせるサブグレーティングに分

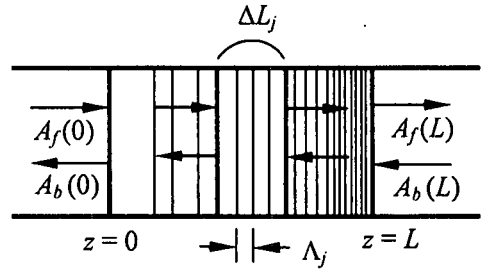


図-15 伝達マトリクス法におけるモデル化

割し(図-15)、その重ね合わせの効果として全体のスペクトルを算定する方法である。

位置 z_j から始まり格子間隔が一定と見なせる長さ ΔL_j のサブグレーティング中で、前方(入射方向)に進行する光と後方に進行する光の振幅をそれぞれ $A_f(z)$, $A_b(z)$ とする。このとき、入出力に関する振幅の関係が、伝達マトリクスにより以下のように与えられる。

$$\begin{Bmatrix} A_b(z_j) \\ A_f(z_j) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_b(z_j + \Delta L) \\ A_f(z_j + \Delta L) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここで、

$$T_{11} = \bar{T}_{22} = \frac{\Delta\beta \sinh(\gamma\Delta L) + i\gamma \cosh(\gamma\Delta L)}{i\gamma} e^{-i\beta_0\Delta L}$$

$$T_{12} = \bar{T}_{21} = \frac{\kappa \sinh(\gamma\Delta L)}{i\gamma} e^{i\beta_0\Delta L} \quad (8)$$

ただし、

$$\Delta\beta = \beta - \beta_0 = \frac{2n\pi}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}$$

$$\kappa = \frac{\pi\Delta n}{\lambda}$$

$$\gamma = \sqrt{|\kappa|^2 - \Delta\beta^2} \quad (9)$$

である。また $\bar{T}$ は T の共役複素数を表す。よってグレーティング全体では、振幅の関係が以下のように与えられる。

$$\begin{Bmatrix} A_b(0) \\ A_f(0) \end{Bmatrix} = [T_1][T_2] \dots [T_m] \begin{Bmatrix} A_b(L) \\ A_f(L) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ただし、 $[T_j]$ はそれぞれのサブグレーティングにおける伝達マトリクスを表す。また反射率 R は、入力位置での振幅比で決まり、

$$R(\lambda) = \left| \frac{A_b(0, \lambda)}{A_f(0, \lambda)} \right|^2 \quad (11)$$

で与えられる。よって、最終端での前進波の振幅を $A_f(L) = 0$ とし、後進波の振幅として非負の値を選べば、振幅

$A_b(L)$ はキャンセルされ反射率を求めることができる。

4.2 モジュールにおける発生ひずみ

引張試験において、荷重が高いレベルに達するとスペクトルのピークに分裂が生じた。これは偏心による曲げの影響が生じたものと考えられる。また過度の曲げ変形を加えた結果、スペクトルピークが多数に分裂する結果となった。よって以下では、引張試験および曲げ試験でのスペクトル結果を踏まえ、ひずみ分布がスペクトルに及ぼす影響について数値実験により検討を行った。

(1) ひずみ分布の平均値とピーク波長の関係

グレーティング部のひずみ分布が一定でない場合、ピーク波長が分裂するだけでなく、ピーク波長の示すひずみとひずみの平均値が異なる可能性がある。よって、図-16に示すような分布を想定する。Case0はひずみが均一の場合、Case1は直線分布する場合、Case2は直線分布の勾配が大きい場合、Case3は2次曲線分布する場合、Case4は曲線分布の変化量大きい場合である。すなわち、

Case0, Case1, Case2 ($\Delta\Lambda=0\text{nm}, 0.2\text{nm}, 2.0\text{nm}$) :

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Delta\Lambda z \quad (12)$$

Case3, Case4 ($\Delta\Lambda=8.0\times 10^{-5}\text{nm}, 8.0\times 10^{-6}\text{nm}$) :

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Delta\Lambda(z - L)z \quad (13)$$

とした。ただし変化量が小さい場合は 160μ 程度のひずみを想定し、大きい場合は 1600μ 程度のひずみを想定している。また、基本周期を $\Lambda_0=517.0\text{ nm}$ 、グレーティング分割数を 2000、センサ長を約 $L=10\text{mm}$ 、屈折率および屈折率の変化量をそれぞれ 1.5 および 7.0×10^{-5} として解析を行った。

図-17に示す Case0, Case1, Case2 より、ひずみが直線分布することで、ピークが分裂することがわかる。またその度合いが大きくなると、多数のピークが出現し中心波長を同定することが困難になる。一方ひずみの平均値に対応する波長は、各ピークの波長を平均化した波長に等しい。すなわちひずみの平均値が必ずしもピークに対応していない。また図-18に示す Case0, Case3, Case4 より、ひずみが2次曲線分布する場合、ピークが分裂することがわかる。さらにその度合いが大きくなると、多数のピーク波長が生じる結果となった。またひずみの平均値に対応する波長は Case3 では 517.133 nm 、Case4 では 518.333 nm であるが、それぞれに対応するピーク波長は 517.17 nm および 518.95 nm となり、ひずみの平均とピーク波長は若干異なっている。ひずみ変化の度合いが小さい場合ほぼ最大ピークと一致するが、ひずみの変化量大きい場合、最大ピークを示す波長と一致しなくなる。すなわち、ひずみ計測においてひずみの平均値のみを考慮する場合、ピーク波長のみを検知するだけでは誤差が生じる可能性がある。よっ

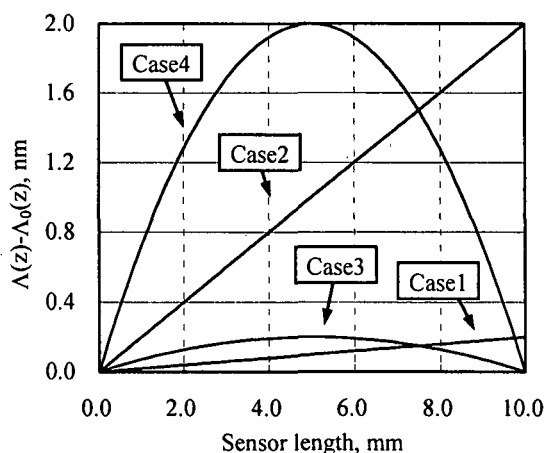


図-16 想定したひずみ分布

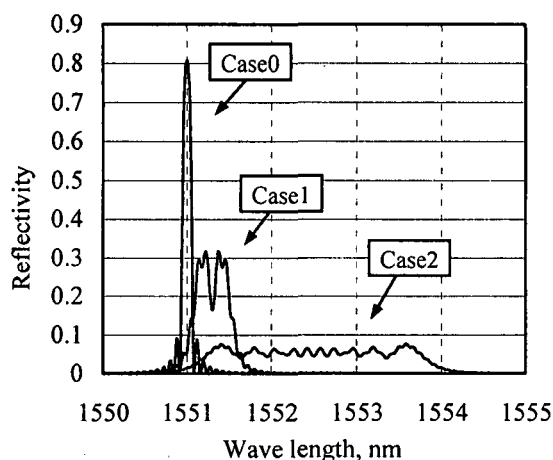


図-17 スペクトルの解析結果 (Case 1, 2)

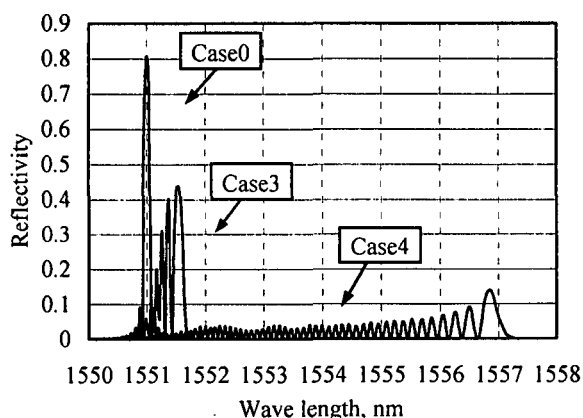


図-18 スペクトルの解析結果 (Case 3, 4)

て正確な計測には、スペクトルの形状を合わせた上でピーク波長とともにひずみを評価する必要がある。

(2) 引張試験結果に対する考察

初期引張試験における最大荷重時のスペクトル中心波長は、 $\lambda = 1552.59\text{ nm}$ であった。いまグレーティングの格子間隔を一定とするならば、中心波長に対応する周期は

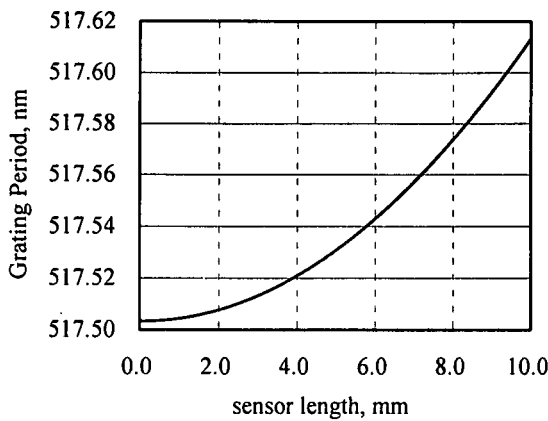


図-19 引張試験で仮定したひずみ分布

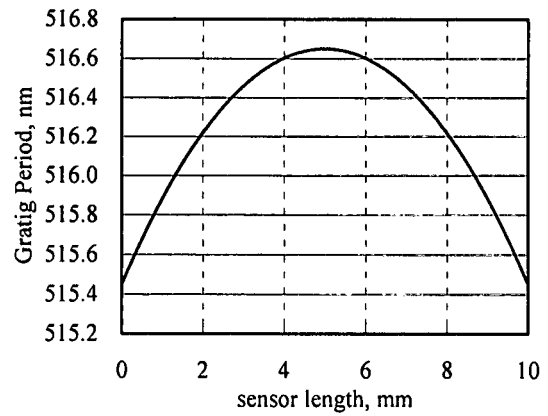


図-21 曲げ試験で仮定したひずみ分布

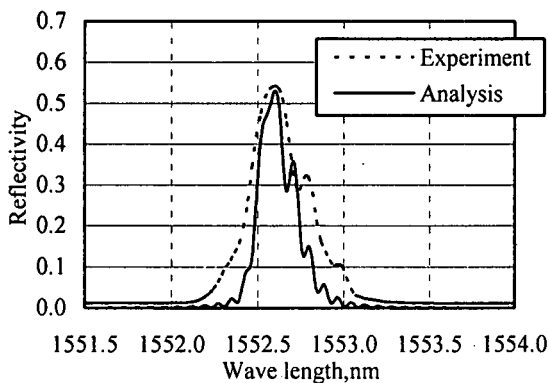


図-20 実験結果および解析結果

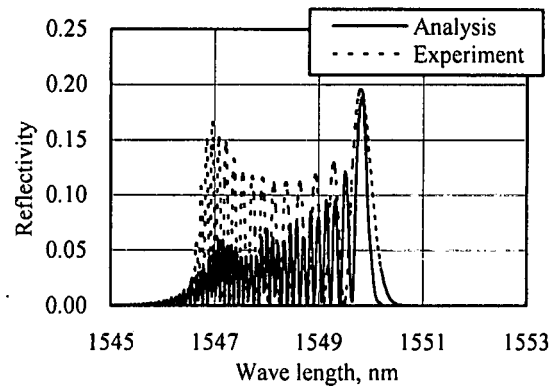


図-22 解析結果および実験結果

式(1)より,

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n} \quad (14)$$

すなわち $n = 1.5$ として, $\Lambda = 517.53 \text{ nm}$ である。また引張試験において発生したと考えられる変形モードは、端部固定の曲げ変形である。よってモジュール軸方向のひずみ分布を単調増加もしくは単調減少の関数で表すことが妥当であるが、スペクトルの一次ピークが比較的明確であることから、ここでは2次曲線を仮定した。また前述の通りひずみの変化量が小さい場合、ひずみ分布の平均値が一次ピークの波長と対応する。よって、センサ端部を頂点とする2次曲線を仮定し、ひずみ分布の平均値が Λ と対応するよう諸係数を決定する。ただし、2次曲線の頂点と端点との差は、2次曲線の重心点を考慮して、試験結果の一次ピークと二次ピークとの差の三分の一を与えた。仮定した2次曲線を図-19に示す。また解析でのグレーティング分割数は2000、センサ長は約10mm、屈折率および屈折率の変化量をそれぞれ1.5および 7.0×10^{-5} と設定した。

図-20に、解析結果および実験結果を示す。2次曲線のひずみ分布を仮定することで、ピークの分裂を再現できていることがわかる。しかし、解析値は実験値の二次ピークおよび三次ピークの出現などは表現できていないものの、実験値に比べてスペクトル幅が狭くなっている。これは、解

析に用いた材料定数（屈折率や屈折率変化量）が実際とは若干異なることや、2次曲線の仮定が不適切であることが原因と考えられる。しかし解析結果はデータの傾向を十分捉えており、定性的評価となるが、引張試験において曲げ等による不均一なひずみが発生していたといえる。ただし、引張試験におけるひずみゲージとの誤差は、そのほとんどが曲げによるモジュール断面方向でのひずみ勾配によるものと考えられる。

(2) 曲げ試験結果に対する考察

曲げ試験におけるスペクトル分布は、ピークが複数に分裂しており、局所的な曲げ変形の影響を受けたものと思われる。図-12より、载荷前におけるスペクトルの最大値を示すピークは1549.86 nmである。よってこの波長に対応する格子周期516.62 nmを平均値とする2次曲線を仮定する。仮定した2次曲線を図-21に示す。またその他の解析条件は(1)と同様に設定した。ただし、2次曲線の頂点と端点との差は、試験結果の右端ピークと左端ピークとの差の三分の一を与えた。

図-22に解析結果および実験結果を示す。ひずみ分布の変化が大きい場合、多数のピーク分裂を生じることがわかる。解析結果と実験結果のスペクトル幅はほぼ等しいが、短波長のピーク群の反射率が実験値よりも小さくなっている。しかし、スペクトルの短波長におけるピーク群が大

きくなるには、よりひずみ分布がばらつくことが必要である。よって定性的ではあるが、少なくともセンサ部に大きなひずみのばらつきが生じていたことが推定される。すなわち、過度の局所的な曲げ変形によりモジュールが一部塑性変形し、不均一な残留ひずみが生じていた可能性がある。

また FBG センサの Bragg 波長検出の方法によっては、ピーク波長のみを検出するものもある⁵⁾。よって正確なひずみ計測には、ピークが複数に分裂する局所的な変形を生じさせないよう留意する必要がある。さらに使用前にピークが複数存在する場合、ピークシフトの同定も困難となるため、弾性範囲内での使用が望ましいと言える。

5. まとめ

FBG センサを用いたひずみ計測モジュールの開発を行い、そのセンサ特性を評価した。その結果、次のような知見が得られた。

- (1) センサの使用範囲を弾性範囲内で定義すれば、本モジュールの使用限界は 2000 μ 程度であることがわかった。
- (2) センサに過度な変形を加えると、不均一な残留ひずみが生じ、その後の計測に影響を与える可能性がある。
- (3) 曲げ試験を行った結果、測定対象のひずみとモジュールのひずみにはある比例関係が見出せた。しかし、ボルト留めによる設置ではガタ量が不確定要因であるため、校正係数による補正は困難である。よって、曲げひずみの計測には、溶接等による完全固定を採用する必要がある。
- (4) 温度適正試験を行った結果、モジュールの温度感度は 18.77 μ /°C であることがわかった。すなわちひずみ計測において、温度変化が及ぼす影響は大きく、屋外での計測など温度変化が生じやすい環境下では温度補償が必要である。
- (5) ひずみ分布が反射波長のスペクトルに及ぼす影響を解析により考察した結果、ピーク波長の示すひずみとひずみ分布の平均値とは異なる可能性があることがわかった。よって、正確な計測にはピーク波長だけでなく、スペクトルの形状を考慮する必要がある。
- (6) 引張試験および曲げ試験において発生したと見られる局所的なひずみ分布を 2 次曲線で仮定し、スペクトルを算定した結果、不均一なひずみの発生を定性的に評価することができた。

謝辞

本研究は、EE 産学連携研究会の FODD 部会における研究の一環として行われました。基礎設計をされた企業の方、またモジュールを作成していただいた日立電線の方々に

感謝の意を表す。なお、本研究の一部は、科学研究費補助金 (No.13555132) の補助を受けて行った。

付録 A ホスト貼付時における FBG 温度感度式の導出

線膨張係数 α_F を有する FBG センサが、線膨張係数 α_H の被計測体に完全接着されているとする（仮に $\alpha_H > \alpha_F$ とする）。このとき温度上昇 ΔT により被計測体が自由膨張するならば、FBG に導入される応力は以下になる。

$$\Delta\sigma = E_F(\alpha_H - \alpha_F)\Delta T \quad (\text{A-1})$$

ただし、 E_F はファイバの弾性係数である。

一方 Bragg 波長は、格子周期と屈折率の関数であるため、作用応力と温度の関数となる。よって微小温度 ΔT および微小作用応力 $\Delta\sigma$ に対する Bragg 波長の変化量は、式(1)を用いて以下のように展開できる⁵⁾。

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_B &= \left[\frac{\partial\lambda_B}{\partial\sigma} \right]_T \Delta\sigma + \left[\frac{\partial\lambda_B}{\partial T} \right]_\sigma \Delta T \\ &= 2n\Lambda \left\{ \left[\frac{\partial\varepsilon}{\partial\sigma} \right]_T + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial n}{\partial\varepsilon} \right]_T \left[\frac{\partial\varepsilon}{\partial\sigma} \right]_T \right\} \Delta\sigma \\ &\quad + \left\{ \left[\frac{\partial\varepsilon}{\partial T} \right]_\sigma + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial n}{\partial T} \right]_\sigma \right\} \Delta T \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

さらに弾性係数および線膨張係数を用いて、

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \left\{ 1 + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial n}{\partial\varepsilon} \right]_T \right\} \frac{\Delta\sigma}{E_F} \\ &\quad + \left\{ \alpha_F + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial n}{\partial T} \right]_\sigma \right\} \Delta T \end{aligned} \quad (\text{A-3})$$

となる。ここで式(A-1)、式(A-3)より、

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \left\{ 1 + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial n}{\partial\varepsilon} \right]_T \right\} (\alpha_H - \alpha_F) \Delta T \\ &\quad + \left\{ \alpha_F + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial n}{\partial T} \right]_\sigma \right\} \Delta T \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

よって、応力に対する体積変化と光弾性効果の項および温度勾配の項を

$$\begin{aligned} S_\varepsilon &\equiv 1 + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial n}{\partial\varepsilon} \right]_T \\ S_T &\equiv \alpha_F + \frac{1}{n} \left[\frac{\partial n}{\partial T} \right]_\sigma \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

とおけば、温度感度式は以下になる。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = [S_\varepsilon(\alpha_H - \alpha_F) + S_T]\Delta T \quad (\text{A-6})$$

参考文献

- 1) 大島俊之：光ファイバーなど先端材料の利用技術，Intelligent Bridge/ Structure and Smart Monitoring に関する公開講演会，土木学会・構造工学委員会・橋梁振動モニタリング研究小委員会，pp.9-21，1999.11.
- 2) 鈴木哲也ほか：光ファイバーを利用した斜面変状監視のためのモデル実験，第 32 回地盤工学研究発表会(熊本)，地盤工学会，pp.2639-2640，1997.7.
- 3) 大越孝敬編著：光ファイバセンサ，オーム社，1986.7.
- 4) 熊谷仁志，三田彰，岡公隆，大野博重：コンクリート構造用光ファイバセンサの開発と実証，コンクリート工学，Vol.38，No.7，pp.17-21，2000.7.
- 5) Raymond M. Measures, Structural Monitoring with Fiber Optic Technology, academic press, pp.160-323, 2001.
- 6) G. Meltz, "Overview of Fiber Grating-Based sensors", SPIE Vol. 2838, pp.2-21, 1996.
- 7) Lawrence R. Chen, "Flexible Fiber Bragg Grating Encoder/Decoder for Hybrid Wavelength-Time Optical CDMA," IEEE Photonics technology letters, Vol.13, No.11, 2001.11.
- 8) 石川真二：光ファイバグレーティングによる精密計測技術，応用物理，第 69 巻 第六号，pp.648-654，2000.
- 9) Turan Erdogan, "Fiber Grating Spectra," Journal of Lightwave Technology, Vol.15, No.8, pp.1277-1294, 1997.8.
- 10) Huang et al., "Bragg intragrating structural sensing," Applied Optics, Vol.34, No.22, pp.5003-5009, 1995.8.

(2002 年 4 月 19 日受付)