

傾斜分布ひずみを用いた光ファイバーFBG センサーの研究

岩田弘^{*1}, 橋本良夫^{*1}, 宮武颯一郎^{*2}, 横内孝史^{*3}

Study on Optical Fiber Bragg Grating Sensor using Functionally Gradient Strain

Hiromu IWATA, Yoshio HASHIMOTO, Soichiro MIYATAKE and Takashi YOKOUCHI

Abstract

The sensor system using an optical fiber FBG device is usually high-cost system in order to have to measure the optical wavelength. In this study, the possibility of a new low-cost sensor system which used the FBG device was proposed. Here, it was focused that the reflectance in the Bragg wavelength which changes with the grating length of a FBG device and the change characteristic of reflection-spectrum bandwidth. This sensor system is realizable by functionally gradient distributing grating pitch. In this paper, it was confirmed that the analytical and experimental results of this theoretical principle are well in good agreement.

Keywords : Sensor , Fiber Bragg Grating , Optical Fiber , Wavelength , Optical Power

1 緒言

光ファイバーは、DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing, 高密度波長分割多重方式) に代表される超高速通信を支える重要なデバイスであり、近年では通信インフラとして身近なものとなっている。一方、光ファイバーは各種の機能素子としての特性を付与することが可能であり、この重要な応用例として、光ファイバー-FBG (Fiber Bragg Grating) 素子^{1,4)}がある。

FBG 素子は、光ファイバーのコア部の光軸方向に周期的な屈折率分布の摂動を与えて回折格子を形成したものである。このとき、この屈折率摂動によって生じる入射光と反射光の相互作用に起因し、摂動周期によって決まる Bragg 波長光の選択的反射を生じる。このため、光波長フィルタのほか、波長制御素子、分散補償素子などとして広く利用されている。

いま、この光ファイバー-FBG 素子に外部から軸方向の力が作用すると、光ファイバー素材である石英ガラスの材料弾性によって摂動周期が伸縮するため、Bragg 反射波長も変化する。したがって、この波長の変化か

ら光ファイバーに作用した力を推定することが可能である。この性質を利用した FBG センサは多く研究され、既に一部実用化されている。検出信号に光を用いているため電磁ノイズに強く、光ファイバーの特性から遠距離計測が可能であり、高機能各種センサとして注目されている。

しかしながら、この FBG 素子から得られる反射波長の変化を計測するには、通常、光スペクトラムアナライザやインテロゲータなどの高価な計測器が必要になるため、FBG 物理量センサの普及にとって最大の障害となっている。

本報では、FBG 素子の光波動的な反射特性に着目し、光ファイバーへの物理的作用を FBG 素子の全長における傾斜ひずみに変換したとき、物理量を反射光量の変化のみでもとらえることが可能であることを解析と実験によって示した。このことにより、反射光を測定可能で安価なフォトダイオードを使用した低コストな光ファイバー-FBG センサシステムが実現可能となる。

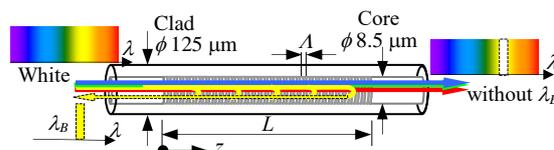


図1 光ファイバー-FBG 素子の構造。

*1 香川高等専門学校 機械工学科

*2 香川高等専門学校 専攻科

(現. 香川県広域水道企業団)

*3 香川高等専門学校 通信ネットワーク工学科

2 理論解析

光ファイバーは、直径 125 μm の円柱状石英ガラス製光ファイバーのクラッドの軸中心部にゲルマニウム Ge をドーブして屈折率が高い直径約 8.5 μm のコア部を有するコア・クラッド構造を有している。さらに FBG 素子は、紫外線エキシマレーザー (KrF, 波長 248 nm) 光などを用いて、図1に示すように、コアの光軸方向に周期 Λ が約 0.5 μm の周期的な屈折率の摂動をグレーティング長 L 全域にわたって付与する加工を行った構造を有している。

2.1 モード結合理論による FBG 素子のスペクトル特性

図1に示す構造の FBG 素子のコアに光を入射するとき、一定の摂動周期 Λ によって決まる Bragg 波長 λ_B の光が選択的に反射されるが、この FBG 素子の特性は、光ファイバーコア部の入射光（進行波）と摂動部で生じる反射光（後退波）との相互作用を解析するモード結合理論¹⁴⁾により求めることができる。

ここでは図のように、光が左側から FBG 素子に入射する場合を考える。このとき、右向きに進行する入射光および左向きに進行する反射光とその結合を検討する。

まず、屈折率 n のガラス中を伝搬する光の波動は、

$$A(z,t) = A \exp(-ikz) \exp(i\omega t) \quad (1)$$

で表される。ここで角周波数 ω 、波長 λ 、時間 t 、光軸上の位置 z であり、 $k=n\omega/c$ は波数である。

FBG 素子の入射光と反射光のように二つの波の伝搬方向が逆で、伝搬媒質であるコアの屈折率に周期的な摂動があるとき、入射光と反射光との間でモード結合が生じる。

ここで FBG 素子の屈折率摂動の周期を Λ とすると、Bragg 波長 λ_B は、

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

と表される。

つぎに、入射光の波長 λ 、光ファイバーのコア部の屈折率 n 、FBG 素子の屈折率摂動の振幅 Δn 、モード結合の効率係数を η とする。さらに、入射光と反射光のモード間結合係数を κ 、光の伝搬係数を β 、位相の不整合

を表すパラメータを φ とすると、これらは次式で表される。

$$\kappa = \eta \frac{\pi \Delta n}{\lambda_B} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda} = kn \quad (4)$$

$$\varphi = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (5)$$

ここで、光ファイバーセンサとしての利用時の入射光および反射光について想定してみると、FBG 素子へ基準強度の光が入射され、屈折率摂動のある FBG 素子部分以外では反射光は生じないものと考えられる。

これを境界条件として入射光と反射光の強度分布を求める。

ここでモード結合理論によると、 $|\varphi| < \kappa$ となる波長のとき、入射波の大部分が反射されることになる。このような波長帯域を阻止帯域(ストップバンド)と呼び、このとき、

$$\frac{\pi}{\Lambda} - \kappa < \frac{\omega}{c} n < \frac{\pi}{\Lambda} + \kappa \quad (6)$$

であり、 $|\varphi| = \kappa$ となる波長は、

$$\lambda = \frac{1}{1 \pm \eta \Delta n / 2n} \lambda_B \approx (1 \pm \frac{\eta \Delta n}{2n}) \lambda_B \quad (7)$$

である。

すなわち、阻止帯域幅は摂動屈折率振幅 Δn によって決まることになる。

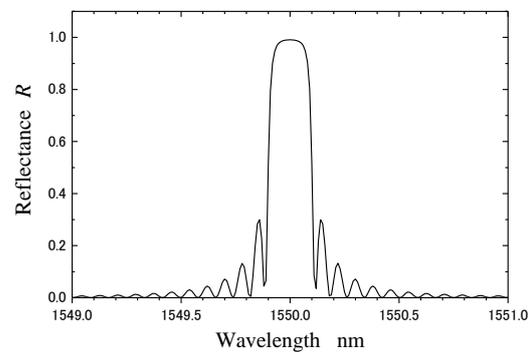


図2 モード結合理論によって計算した FBG 素子の反射スペクトル。

本研究で使用するシングルモード光ファイバー SMF-28 (Corning Co. Ltd.) におけるパラメータ値, $n=1.45$, $\Delta n=0.00015$, $\lambda_B=1550$ nm, $\eta=0.95$ として, モード結合理論によって求めたグレーティング長 $L=10$ mm のときの反射スペクトル特性解析例を図2に示す. このとき, FBG 素子の反射スペクトルは, 式(2)の *Bragg* 波長をピークにした分布特性を示している.

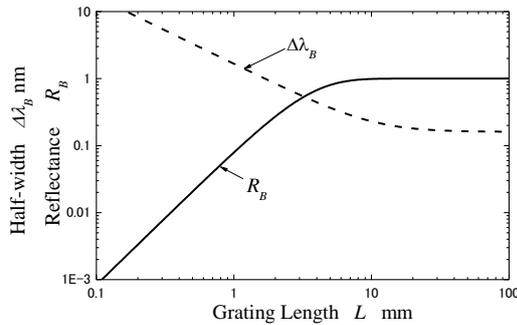


図3 FBG 素子の反射スペクトルの帯域幅とピーク反射率のグレーティング長依存特性.

2.2 グレーティング長による反射特性の推移

FBG 素子の反射スペクトルのピークである *Bragg* 波長 λ_B における反射率 R_B および, 反射スペクトルの帯域幅 $\Delta\lambda_B$ は, 次式となる.

$$R_B = \tanh^2(\kappa L) \quad (8)$$

$$\Delta\lambda_B = \frac{\lambda_B^2}{nL} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta n L}{\lambda_B}\right)^2} \quad (9)$$

したがって, このピーク反射率 R_B とスペクトル帯域幅 $\Delta\lambda_B$ はグレーティング長 L によって変化するが, この推移を図3に示す.

これによると, グレーティング長 L が充分長いとき, 図の解析結果に示すように, *Bragg* 波長におけるピーク反射率および, 反射スペクトル幅はそれぞれ一定の値に収束し, これは次式となる.

$$\lim_{L \rightarrow \infty} R_B = 1, \quad \lim_{L \rightarrow \infty} \Delta\lambda_B = \frac{\Delta n}{n} \lambda_B \quad (10)$$

一方, グレーティング長 L が充分短い領域においては, 一様な変化傾向を示すが, これは次式,

$$\lim_{L \rightarrow 0} R_B = (\kappa L)^2, \quad \lim_{L \rightarrow 0} \Delta\lambda_B = \frac{\lambda_B^2}{nL} \quad (11)$$

となり, それぞれグレーティング長に依存した特性を示している.

これから両特性の境界となる臨界グレーティング長が定義される. 反射率および反射スペクトル幅のそれぞれについて, 臨界グレーティング長は次式となる.

$$L_{cR} = \frac{1}{\kappa} \quad (12)$$

$$L_{c\Delta} = \frac{\lambda_B}{\Delta n} \quad (13)$$

光ファイバー SMF-28 について具体的な値で計算すると, 上の式から求めた反射率に関する臨界グレーティング長 L_{cR} は 3.46 mm であるのに対し, 反射スペクトル幅に関する臨界グレーティング長 $L_{c\Delta}$ は 10.3 mm と異なる値であった.

FBG 素子の反射光量がピーク反射率と反射スペクトル幅の積に概ね比例することを考慮すると, グレーティング長が充分長い領域では, FBG 素子の反射光量の推移は一定の値をとるものと考えられる. 一方, グレーティング長が臨界グレーティング長より充分短い領域においては, 反射光量の指標となる反射率とスペクトル幅の積は,

$$\lim_{L \rightarrow 0} (R_B \times \Delta\lambda_B) = \frac{(\kappa \lambda_B)^2}{n} L \quad (14)$$

となり, FBG 素子の全反射光量はグレーティング長 L に比例するものと推定される.

モード結合理論に基づく計算シミュレーションにより, 上述のシングルモード光ファイバーおよび FBG 仕様の場合において反射スペクトルを求め, これから反射光量の推移を計算した結果を図4に示す. これによると, FBG 素子の反射光量は, グレーティング長が充分長い領域においては一定の値をとり, 式(14)で推定したようにグレーティング長が充分短い領域ではグレーティング長に比例した特性となっている. 実際の光ファイバーの場合, 反射スペクトル分布の形状が該矩形波状から該半波正弦波状に変化するため, 式(14)の約 0.54 倍の反射光量であった.

この推移特性から, 反射特性においても臨界グレーティング長 L_c が存在し, 図の通常のシングルモード光ファイバー SMF-28 の場合, 約 3.3mm となった.

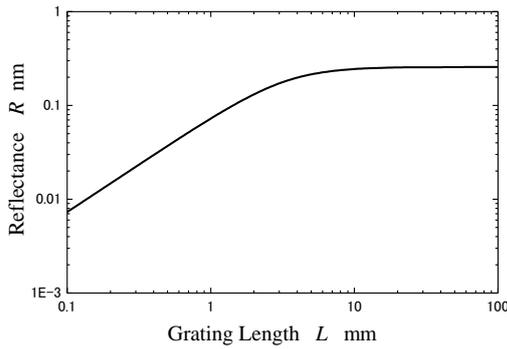


図4 FBG 素子反射光量のグレーティング長依存特性.

2.3 傾斜分布ひずみ FBG 素子の反射特性の推移

グレーティング部を一次関数で表される摂動周期 $A(z) = A_0 + az$ に一様傾斜的に分布させた FBG 素子の場合を考える. このような FBG 素子は, 幅広い波長帯域を反射するスペクトル特性を示し, 一般に **chirp-FBG 素子**といわれる.

ここで, 前節で扱った摂動周期が均一な FBG 素子 (以下, **uniform-FBG 素子**) に, グレーティング長全長にわたって一次関数で表される一様傾斜的に変化し分布する張力を印加した場合を考える. このとき摂動周期は, 光ファイバーの材料弾性によって, 張力分布に応じた傾斜分布ひずみを生じ, 一次関数で表される摂動周期となる. したがってこのときの **uniform-FBG 素子**は, **chirp-FBG 素子**と同様に, 幅広い波長帯域を反射するスペクトル特性を示すものと考えられる.

uniform-FBG 素子の場合では, 入射波を $A(z)$, 反射波を $B(z)$ とすると, 前節の解析結果は FBG 素子内の光の伝搬行列 \mathbf{F} を用いると, 次式のように表記される.

$$\begin{Bmatrix} A(0) \\ B(0) \end{Bmatrix} = \mathbf{F} \begin{Bmatrix} A(L) \\ B(L) \end{Bmatrix} \quad (15)$$

次に, **chirp-FBG 素子**の特性を求めるとき, 図5のように, **chirp-FBG 素子**を全長にわたって M 分割し, それぞれの分割領域は摂動周期の変化とともに段階的に推移させた伝搬行列 \mathbf{F}_i を持つ **uniform-FBG** として扱い, これを FBG 素子の全長で連結して扱う. このとき全体の伝搬関係^{15,6)}は次式となる.

$$\begin{Bmatrix} A(0) \\ B(0) \end{Bmatrix} = \mathbf{F}_1 \mathbf{F}_2 \cdots \mathbf{F}_i \cdots \mathbf{F}_M \begin{Bmatrix} A(L) \\ B(L) \end{Bmatrix} = \mathbf{F} \begin{Bmatrix} A(L) \\ B(L) \end{Bmatrix} \quad (16)$$

これから, **chirp-FBG 素子**の伝搬行列は次式となる.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 \mathbf{F}_2 \cdots \mathbf{F}_i \cdots \mathbf{F}_M = \prod_{i=1}^M \mathbf{F}_i \quad (17)$$

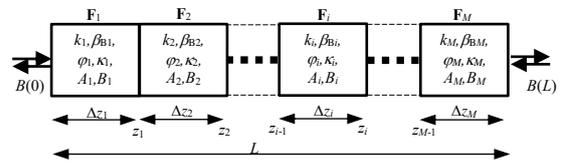


図5 M 個に分割された **uniform-FBG 素子**セグメントを結合した解析モデル.

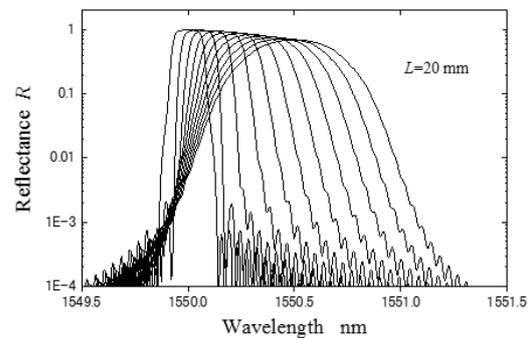


図6 **chirp-FBG 素子**の反射スペクトルの解析結果.

光ファイバー-SMF-28 について, この解析方法によって求めた計算結果の例を, 図6に示す. ここでは FBG 分割数 $M=100$ として計算した.

このとき, 式(3)から, グレーティング長の両端における摂動周期の変動差 ΔA と **Bragg** 反射波長帯域幅 $\Delta \lambda$ は次式である.

$$\Delta \lambda = 2n\Delta A \quad (18)$$

いま, 一次関数で表される摂動周期となった **uniform-FBG 素子**として, グレーティング長の両端における摂動周期の差 ΔA がゼロから変化する場合を考える. なお, ここでは臨界グレーティング長 L_c より **uniform-FBG 素子**のグレーティング長 L が長い場合を議論する.

このときの全反射光量の推移を, 摂動周期のひずみ増加に沿って考察すると, 概ね次のように考えられる. このときの概説図を図7に示す.

最初に, 傾斜分布ひずみが比較的小さいとき, これによる摂動周期差の広がりとは **Bragg** 反射波長帯域幅 $\Delta \lambda$ は比較的小さく, この場合は **Bragg** 反射波長帯域内の波長 λ に **Bragg** 回折効果を与えるグレーティング長 L_d

は臨界グレーティング長 L_c と比較して充分長い状態にある。このため、波長 λ における反射率 R は、ほとんど低下しない。しかしこのとき、摂動周期差 $\Delta\lambda$ の拡がりとともに $Bragg$ 反射波長差 $\Delta\lambda$ が増加するため、反射スペクトル幅は拡大する。この結果、FBG 素子の反射スペクトル全体として、摂動周期差 $\Delta\lambda$ とともに反射光量が徐々に増加する。

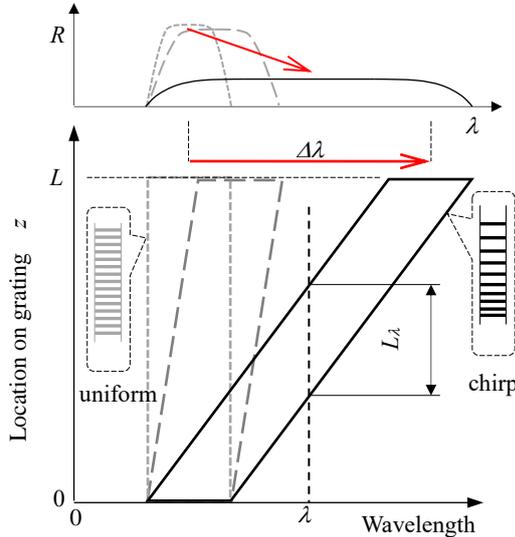


図7 傾斜分布ひずみを受ける FBG 素子の反射特性推移のしくみ

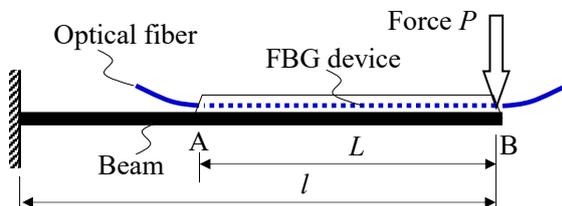


図8 uniform-FBG 素子を貼り付けた片持ちはり。

つぎに、傾斜分布ひずみが充分大きいとき、反射スペクトル内のある特定の波長 λ に $Bragg$ 回折効果をもたらす等価グレーティング長 L_λ は、 $Bragg$ 反射波長差 $\Delta\lambda$ に反比例して短くなる。この等価グレーティング長 L_λ が臨界グレーティング長より短くなると、波長 λ の反射率はこの等価グレーティング長 L_λ に比例して小さくなる。ところがこのとき同時に、 $Bragg$ 反射波長差 $\Delta\lambda$ は等価グレーティング長 L_λ に反比例して拡大する。このため、傾斜分布ひずみが大きくなっても、FBG 素子の反射スペクトル全体として反射光量はほぼ一定の値をとるものと推定される。

傾斜分布ひずみが上述の中間域で、反射スペクトル内の波長 λ に $Bragg$ 回折効果をもたらす等価グレーティング長 L_λ が臨界グレーティング長付近の遷移域に

あるとき、波長 λ の反射率は過渡的な特性を示すため、全反射光量は非線形な推移を示すものと考えられる。

以上の議論から、一様傾斜ひずみでグレーティング長の両端における摂動周期の差 $\Delta\lambda$ を連続的に変化させたとき、FBG 素子の反射光量も変化する特性が得られるものと推定される。

3 実験

3.1 片持ちはり表面の傾斜分布ひずみ

今回の実験では、一次関数状の傾斜分布ひずみを与えるために、片持ちはりを用いた。

図8のように、ヤング率 E の材料で製作した片持ちはり（長さ l 、幅 b 、板厚 h 、断面二次モーメント I ）の表面に、片持ちはり自由端（荷重点）からグレーティング長 L でブラッグ反射波長 λ_0 の uniform-FBG 素子を片持ちはりの長手軸方向に貼付けた。

いまこの片持ちはりの自由端に面外から荷重 P を印加した場合を考える。このとき、片持ちはり上の FBG 素子の両端の A、B 点における片持ちはり表面のひずみ ε_A 、 ε_B は、

$$\varepsilon_A = \frac{PLh}{2EI}, \quad \varepsilon_B = 0 \quad (19)$$

として与えられる。

一方、FBG 素子の初期の摂動周期 λ_0 は外力によって生じるひずみによって変化するが、これは、

$$\lambda_A = \lambda_0(1 + \varepsilon_A) = \lambda_0\left(1 + \frac{Lh}{2EI}P\right), \quad \lambda_B = \lambda_0 \quad (20)$$

で与えられる。したがって、片持ちはり表面は貼り付けられた FBG 素子の両端 A、B 点では摂動周期に差 $\Delta\lambda$ が生じる。これは次式で与えられる。

$$\Delta\lambda = \lambda_A - \lambda_B = \lambda_0 \frac{Lh}{2EI}P \quad (21)$$

このとき、 $Bragg$ 反射波長帯域の拡大幅 $\Delta\lambda$ は、

$$\Delta\lambda = 2n\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{Lh}{2EI}P \quad (22)$$

となる。

また、片持ちはり先端の横荷重 P とたわみ u には、

$$P = \frac{3EI}{l^3}u \quad (23)$$

の関係があるため、*Bragg* 反射波長帯域の拡大幅 $\Delta\lambda$ をたわみ u で表すと、

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{3Lh}{2l^3}u \quad (24)$$

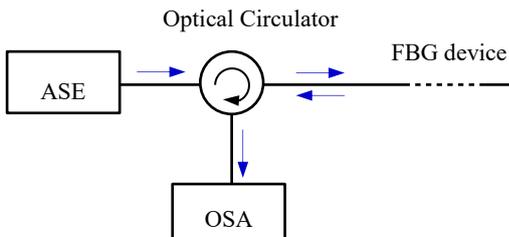
の関係式が得られる。

このように片持ちはりの先端に面外荷重が加わると、この表面の長手方向に貼り付けた *uniform*-FBG 素子は一様傾斜ひずみ分布を生じ、*chirp*-FBG と同等な反射スペクトル帯域幅増加の効果が得られるものと考えられる。

3.2 片持ちはりを用いた実験結果

実験においては、長さ 50 mm、 $b=10$ mm、 $h=0.5$ mm のリン青銅板に、はり先端から 15 mm の荷重印加点からグレーティング長 $L=20$ mm の *uniform*-FBG 素子をエポキシ接着剤とポリイミドシートで貼付けた。このとき片持ちはり有効長さ $l=35$ mm となる。この片持ちはりを治具で固定し、片持ちはりをマイクロメータヘッドで強制変位させて、*uniform*-FBG 素子に式(19)で得られる一様傾斜ひずみ分布を与えた。ここでひずみには引張りと圧縮の両方が考えられるが、圧縮の実験時は片持ちはりの面を反転させ、*uniform*-FBG 素子の貼付け面の裏側から強制変位を与えた。

実験装置の光学系は、図9のように、広帯域の発光特性を有する ASE 光源 (Amplified Spontaneous Emission, ASE-C-10S, FiberLabs Inc.) と光スペクトラムアナライザ (AQ6315, 安藤電機株) を用いて光回路を構成し、FBG 素子の反射スペクトル特性を計測した。このとき、反射光量はスペクトル特性の積分によって求めた。



ASE: Amplified Spontaneous Emission Light Source
OSA: Optical Spectrum Analyzer

図9 実験装置の光回路の構成.

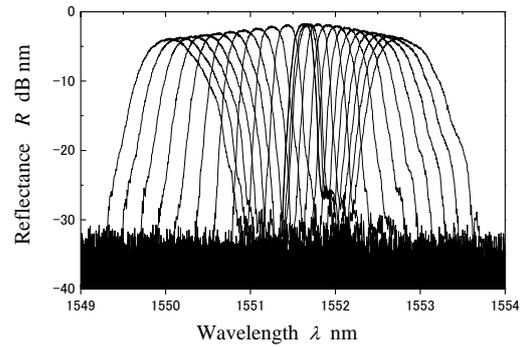


図10 片持ちはり先端を強制変位させたときの反射スペクトルの推移

マイクロメータヘッドを用いて片持ちはり先端に強制変位を与えたときの FBG 素子の反射スペクトルの変化の様子を図10に示す。ここで、FBG 素子が無ひずみのときの中心波長 (*Bragg* 波長) は 1551.6 nm であった。短波長側にシフトしているスペクトルが FBG 素子の圧縮時、長波長側にシフトしたスペクトルが引張りのひずみを与えた場合である。このときのひずみは傾斜分布ひずみとなっているため、圧縮と引張りのそれぞれにおいて、ひずみの増加とともに中心波長がシフトし反射スペクトル幅が拡大している。したがって、本実験装置で FBG 素子に傾斜ひずみ分布を与えていることが確認できた。ただし、反射スペクトル幅の拡大量は、片持ちはり表面のひずみ量に比べ約 0.3 倍と小さな値であった。これは通常の *uniform*-FBG 素子を用いたひずみ計測実験でも必ず生じる現象であるが、光ファイバーの直径が 125 μm と比較的太いために光ファイバーの伸縮に比較的大きな力が必要となり、これが原因で光ファイバーFBG 素子を貼付けた接着剤がひずみを緩和していることが原因と考えられている。

また、反射スペクトルのピーク反射率は、傾斜分布ひずみの増加とともに減少する傾向が見られる。これはひずみの増加とともに、等価グレーティング長 $\Lambda\lambda$ が減少したためと考えられる。

このとき FBG 素子の全反射光量は、図11に示すように推移した。図のように、一様傾斜ひずみ分布の圧縮と引張りのいずれの場合においても、全反射光量はひずみと共に増加している。さらにひずみが大きくなると全反射光量の増加傾向がやや低下し、飽和に向かう傾向が見られる。また、同図のひずみが非常に小さな領域 ($\Delta\varepsilon < \text{約 } 0.00035$) では光量の増加傾向が小さい。これは、実験に用いた FBG 素子の反射スペクトルが、完全な矩形形状ではなく反射スペクトルの

サイドローブを抑制するために半波正弦波状になっていることに起因しているものと考えられる。この特性の計算シミュレーションの結果を図12に示す。前述の接着剤に起因するひずみ緩和の効果を考慮するとほぼ実験結果と一致する結果が得られたものと考えられる。

以上の実験結果から、片持ちはり表面の横荷重印加点からの距離差を利用して、一様で傾斜分布ひずみを生じた uniform-FBG 素子の反射光量から、荷重を計測可能なことが確認できた。

4 結言

電磁ノイズに対する耐性や長距離信号伝送性などの特徴を有する光ファイバー-FBG 素子を用いた各種センサへの応用に際して、コスト的な課題を有する波長測定が不要な新しいセンサ構成方法を提案し検討した。これは、標準的な uniform-FBG 素子を用いて、この光軸方向のひずみが外力によって傾斜分布を生じるように工夫をしたものであり、FBG 素子の反射特性から理論的に解明した。また、片持ちはりのモーメント分布特性を利用して実験的に確認した。

理論解析においては、光ファイバー-FBG 素子内における入射光と反射光間のモード結合理論により解析を行い、uniform-FBG 素子のグレーティング長による反射光量の特性と、傾斜ひずみ分布による等価グレーティング長の変化から、反射スペクトルと反射光量の推移を計算で推定した。

実験においては、片持ちはりの荷重点からの距離の差によって生じるモーメントの傾斜分布を利用して、片持ちはりの軸方向に貼り付けた uniform-FBG 素子に傾斜分布ひずみを与えた。この実験の結果、片持ちはりの荷重の増加とともに、この FBG 素子からの反射光量が変化した。この特性は、圧縮と引張りのいずれの傾斜分布ひずみの場合においても、ほぼ等しい傾向が得られた。

このことから、高価な機器を必要とする光波長計測の不要な新しい方式の光ファイバー-FBG センサの有効性と応用の可能性を確認することができた。

本研究を遂行するにあたり多くの貴重なアドバイスを頂いた香川大学名誉教授 江島正毅先生とファイバーラボ株式会社 代表取締役 三村榮紀様に謝意を表します。

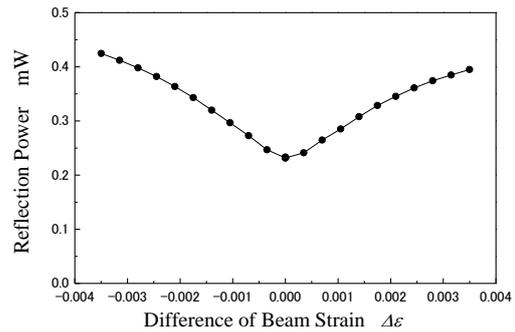


図11 片持ちはりのひずみによる反射光量の計測結果。

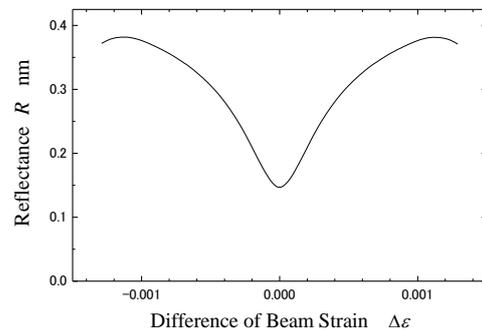


図12 片持ちはりのひずみによる反射光量の計算結果。

参考文献

- 1) Kashyap, R., Fiber Bragg Grating, Academic Press, pp119-188, (1999).
- 2) 川上彰二郎,大橋正治,白石和男,“光ファイバとファイバ形デバイス”,pp192-195,培風館,(1996).
- 3) 岡本勝就,“光導波路の基礎”,pp133-141,コロナ社,(1992).
- 4) 左貝潤一,“導波光学”,pp143-151,共立出版,(2004).
- 5) Erdogan, T., Fiber Grating Spectra, Journal of Light-wave Technology, Vol.15, No.8, pp.1277-1297, (1997).
- 6) Yamada, M. Sakuda, K., Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach, Applied Optics, Vol.26, No.16, pp.3474-3478, (1987).