

温度補償機能を持つ FBG 歪センサの研究

FBG Strain Sensor with Temperature Compensation

早野 洋史*・三田 彰**

Hiroshi HAYANO and Akira MITA

*慶應義塾大学大学院生, 理工学研究科開放環境科学専攻(〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3 丁目)

**Ph.D., 慶應義塾大学助教授, 理工学研究科開放環境科学専攻(〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3 丁目)

An FBG-based strain sensor equipped with a mechanical temperature compensation system is proposed. Direct bonding of an FBG element, that is the simplest method to measure strains, may cause broadening of the reflected optical spectrum due to fluctuation of strain distribution of the material under the FBG element. The proposed sensor avoids this difficulty by introducing a mechanism to induce uniform strain distribution to the FBG element. In addition, a simple mechanical system that can cancel the effect of temperature on the strain measurement does eliminate the addition of another FBG sensor for temperature compensation. Extensive tests have been conducted using prototype sensors. The results showed their excellent performance.

Key Words : FBG, Strain Sensor, Health Monitoring

1. 緒言

破損や破壊が重大事故につながる可能性の高い構造物は, 日常的な点検・整備を行い, その信頼性を向上させる必要があることは言うまでもない¹⁾. そこで注目されている技術が構造ヘルスマonitoring技術である.

構造ヘルスマonitoringにより, 構造物は健全性を自ら診断し, 構造物自体の使用寿命が延び, ライフサイクルコストや使用資源量, 廃棄物量を大幅に削減できることも期待されている²⁾. さらにアクティブな機能を含む概念として, 構造部材にセンサ機能, アクチュエータ機能, 制御機能を融合させ, システムとして能動的に知覚, 判断, 応答を行わせる「スマート構造」と呼ばれる概念がある^{3), 4)}. ヘルスマonitoringやスマート構造におけるセンサは,

- ① 構造物の各部, または全体を把握できる分布型計測が可能
- ② 多くの物理量の測定が可能
- ③ 構造物と同等の耐久性
- ④ 構造と一体化が可能
- ⑤ 経済的

などの要求を満たす必要がある.

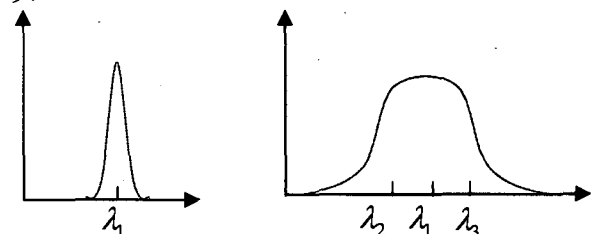
構造ヘルスマonitoringにおける重要なセンシング項目として歪測定を挙げることができる. しかし, 従来型の電気式歪ゲージは, 耐久性に乏しく, 耐食性にも問題

がある. また引火の可能性のある危険区域では防爆性についての特別な配慮が不可欠となる. すなわち, 前述した要求を十分に満たしているとはいいがたい.

近年, 注目されているセンサにブラッググレーティング光ファイバセンサ(FBG センサ)がある^{5) 7)}. FBG センサは, 耐環境性が高い, 防爆性があることに加えて波長分割多重化方式(WDM)や時分割多重化方式(TDM)などを用いて多重化が可能となるといった利点を持っている.

一方で, 測定対象に直接接着した場合, 不均一な歪分布が出力に反映され(図-1), 測定精度の低下を引き起こす. また, FBG の温度補償用に別途 FBG が必要になる問題もある.

本研究では FBG センサに, 均一な歪を生じさせ, さらにメカニカルな温度補償機能を持つ FBG 歪センサについて提案する. さらに温度補償機能をメカニカルに実現する方法を提案し, 実際にセンサの設計, 製作, 評価を行う.



均一な歪分布

不均一な歪分布

図-1 歪分布と出力の関係

2. FBG 歪センサのメカニズム

2. 1 FBG の原理

図-2 に FBG センサの仕組みを示す。FBG センサは反射波長の変化量(波長シフト)を測定することで、物理量の変化を検出するセンサである。FBG の反射波長は FBG のグレーティング間隔とコアの屈折率によって決定される。従って、FBG の反射波長シフトはグレーティング間隔やコアの屈折率を変化させる物理量によって変化することになる。このとき、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯の波長帯において FBG の波長シフト $\Delta\lambda\ (\text{pm})$ と歪 $\varepsilon\ (\mu\varepsilon)$ の比例定数は $1.2\ \text{pm}/\mu\varepsilon$ となる⁹⁾。

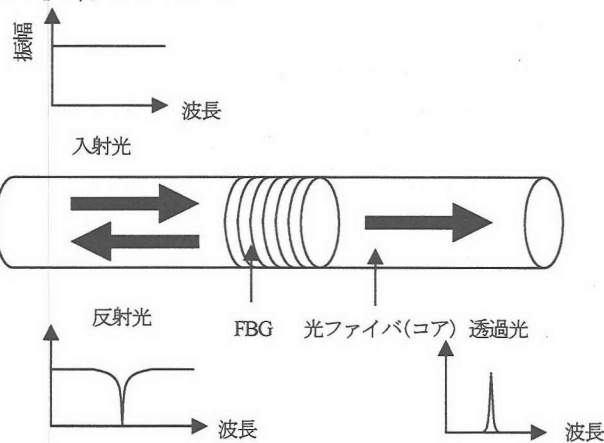


図-2 FBG センサの仕組み⁵⁾

2. 2 メカニズムの基本的考え方

本研究が FBG センサを用いてセンシングを試みる対象は歪である。歪を FBG センサによって測定するためには、この部材の変形という物理量の変化をグレーティング間隔やコアの屈折率の変化に反映させるようなシステムを構築する必要がある。

これを実現する最も簡単な方法が、部材に直接 FBG センサを貼り付ける方法である。部材に対して引張力が加わり部材に歪が生じた場合、部材に接着された FBG センサもまた同時に引張られグレーティング間隔が大きくなる。逆に、部材に対して圧縮力が加わり歪が生じた場合、FBG センサは圧縮されグレーティング間隔が小さくなる。FBG センサに対する単純な引っ張りおよび圧縮による歪と波長シフトの関係は一般的に光ファイバが破断するまで線形な関係を保っているため、この線形関係を利用することにより、波長シフトから歪を算出することができる。しかし、直接接着によるセンシングシステムは、部材の歪分布が一樣でない場合、反射波長にばらつきが起こってしまい、そのまま単純に歪を算出するわけにはいかない。

FBG センサは歪と温度変化の影響を両方同時に受ける。つまり、歪の発生および温度変化の双方を要因として FBG には波長シフトが引き起こされるのである。FBG

センサが温度に対して依存性を持つのは、光ファイバのコアの屈折率 n が温度によって変化するためである。そして、これら 2 つの変動を波長シフトから区別することはできない。このことは、FBG をセンサとして利用する上での制限となり、静的な歪を測定するように設計された歪センサに対して重大な影響を及ぼすことになる。一般に、FBG センサは 1°C の変化によって $9.8\ \mu\varepsilon$ の歪測定誤差が生じてしまう⁹⁾。したがって、FBG センサを利用した歪計測を行う場合、歪と温度の同時計測によって温度補償の行える計測システムを構築しなければならない。このため温度補償用に別途 FBG が必要になるという問題があげられる。

以上のこと踏まえ、従来の FBG 歪センサの課題としては、直接接着による FBG の出力の不安定化および温度変化の影響をあげることができる。本研究ではこれらの課題を解決するため、以下のような手法を提案する。

① 二点支持型 FBG 歪センサ⁸⁾

FBG の直接接着を避けるため、光ファイバを二点でセンサベースに接着した FBG 歪センサ。

② 温度補償⁹⁾¹⁰⁾

温度補償機能を備えた歪計測を行う際に重要な点の 1 つとして、センサデバイスの扱いやすさとシステムのシンプルさが挙げられる。そこで温度補償法としては熱膨張を利用する手法を提案する。これは光ファイバに接着した材料の熱膨張により FBG を意図的にひずませ、温度変化の影響と相殺させ歪のみ計測可能にするものである。

2. 3 均一な歪となる二点支持型 FBG 歪センサ

本研究では、光ファイバを測定対象に直接接着するのではなく、センサベースを製作し、これに光ファイバを二点支持で接着、プレテンションをかけ測定対象に取り付ける方法の検討を行った。この二点支持型 FBG 歪センサの概念図を図-3 に示す。

提案する FBG 歪センサは、センサベースによって二点支持される。これは、FBG を直接接着することによって部材の歪分布がセンサの出力に影響し、不安定化することを防ぐことを目的としている。つまり、二点支持することにより、FBG の直接接着を避け、FBG に引張または圧縮による均一な歪が発生するシステムを構成している。さらに、FBG にはプレテンションをセンサベースを用いてかける。これにより測定対象に生じる圧縮方向への歪を正確に測定することを可能とする。例えば、引っ張り方向へ歪が生じる場合、光ファイバは測定対象の歪に追従して伸張し、格子間隔の変化に歪が正確に反映される。

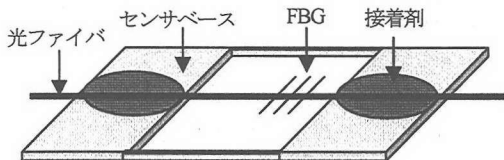


図-3 二点支持型 FBG 歪センサ概念図

一方、圧縮方向へ歪が生じる場合、光ファイバがたるんでしまい、格子間隔の変化に歪が正確に反映されなくなってしまう可能性がある。そこで光ファイバに対してプレテンションをかけることにより圧縮方向の歪に対して光ファイバのたるみを防ぎ、格子間隔の変化が歪に追従することを可能にする。

提案したセンサ機構による歪の測定原理について述べる。プレテンションを利用した二点支持型 FBG 歪センサでは、部材に生じる歪 ε がそのまま FBG の歪 ε_0 になる。この方法を用いると、従来のような直接接着による歪計測とは異なり、FBG に生じる歪は一樣な引張または圧縮に起因することになる。したがって、FBG の波長シフト $\Delta\lambda$ と歪 ε_0 の間に線形関係が成立することになり、この関係から部材に生じる歪 ε を算出することができる。前述したように、FBG における波長シフト $\Delta\lambda$ と歪 ε_0 の関係は $1.2 \text{ pm}/\mu\text{e}$ で換算でき、部材に生じる歪 ε を求めることができる。

2. 4 温度補償のメカニズム

前述したように、FBG センサの反射波長 λ には温度依存性がある。一方で、反射波長 λ はグレーティング間隔 d にも依存する。そこで、反射波長 λ を温度変化に対応させて変化させることで、屈折率変化に起因する反射波長 λ の変化を相殺することができる。本研究で提案する FBG 歪ゲージでは、材料の熱膨張を利用することにより FBG を意図的にひずませ波長シフトを引き起こし、温度変動の影響による波長シフトと相殺させ、歪のみ計測可能にすることができるものと考えられる。温度補償を実現する歪ゲージの概念図を図-4に示す。

図-4に示したようにこの温度補償機能は、二点支持型 FBG 歪センサに温度補償用の部材を1つ取り付けただけの簡単な構造になっている。なお、温度補償部材は光ファイバのみに接着し、部材に対して接着しないものとする。この温度補償部材が温度変化により伸縮、その結果、接着された光ファイバにも歪が生じる。この歪量を FBG の温度依存性による波長シフトと釣り合うように設定することにより温度補償を実現することができる。

まず、センサベースと温度補償部材のパラメータを図-5のようにおき、温度が T_1 から T_2 に上昇したときの温度補償部材による光ファイバへの影響を求める。このとき温度補償部材の線膨張率を α とすると、温度補償部材に生じる歪 ε_c は次式のように求めることができる。

$$\varepsilon_c = \alpha(T_2 - T_1) \quad (1)$$

温度補償部材は光ファイバに接着されているため圧縮応力 σ_2 が発生し、歪 ε_2 が生じる。一方、光ファイバには温度補償部材の影響により引っ張り応力 σ_1 が発生し、歪 ε_1 が生じる。このとき、温度補償部材の膨張収縮による張力変化がロスなく FBG に伝えられると仮定すると次式の関係が成り立つ。

$$\varepsilon_1 L_1 = \sigma_1 \frac{L_1}{E_1} \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 L_1 = \sigma_2 \frac{L_1}{E_2} \quad (3)$$

ここで、 E_1, E_2 はそれぞれ光ファイバと温度補償部材のヤング率を示している。光ファイバと温度補償部材が完全に接着されていると考えるならば、それぞれの長さの変化量は等しくなる。すなわち、

$$\sigma_1 \frac{L_1}{E_1} = \alpha L_1 (T_2 - T_1) + \sigma_2 \frac{L_1}{E_2} \quad (4)$$

が成り立つ。また、光ファイバに生じる引張荷重 $\sigma_1 S_1$ と温度補償部材に生じる圧縮荷重 $\sigma_2 S_2$ は等しいと考えることができるので次式が成り立つ。ただし、 S_1, S_2 はそれぞれ光ファイバと温度補償部材の断面積を示している。

$$\sigma_1 S_1 + \sigma_2 S_2 = 0 \quad (5)$$

式(4)および式(5)の2式よりより光ファイバに生じる歪 ε_1 は次式のようになる。

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha(T_2 - T_1) S_2 E_2}{S_1 E_1 + S_2 E_2} \quad (6)$$

したがって、FBG に生じる歪 ε_0 は次式のように求まる。

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_1 L_1}{L_2} = \frac{\alpha(T_2 - T_1) S_2 E_2}{S_1 E_1 + S_2 E_2} \frac{L_1}{L_2} \quad (7)$$

このとき、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯の波長帯において歪 ε_0 と FBG の波長シフト λ_{strain} の比例定数は $1.2 \text{ pm}/\mu\text{e}$ となるので⁶⁾、

$$\lambda_{\text{strain}} = 1.2 \frac{\alpha(T_2 - T_1) S_2 E_2}{S_1 E_1 + S_2 E_2} \frac{L_1}{L_2} \times 10^6 [\text{pm}] \quad (8)$$

となる。

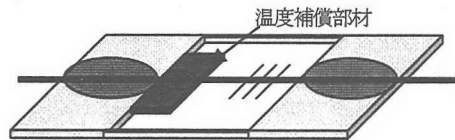


図-4 温度補償機能実装

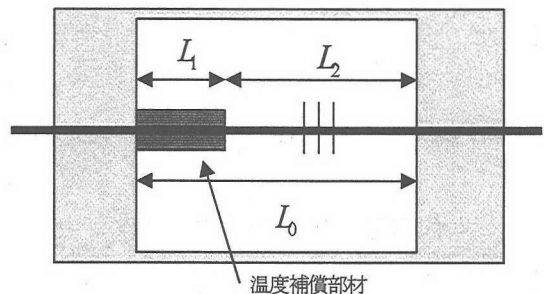


図-5 サイズの定義

一方、FBG の温度変化に対する波長シフトは $1.5 \mu\text{m}$ 帯の波長帯において $9.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ⁹⁾であることから、温度変化によって生じる FBG の波長シフト λ_T は次式のようになる。

$$\lambda_T = 9.8(T_2 - T_1) [\text{pm}] \quad (9)$$

以上の理論的計算により、温度補償部材の歪に起因する FBG の反射波長のシフト量式(8)および FBG の温度依存性に起因する波長シフト量式(9)を求めることができた。温度上昇の場合、温度補償部材は膨張し、FBG には圧縮歪が生じ、反射波長は低波長側にシフトする。逆に、温度依存性による反射波長の変化は温度上昇によって高波長側にシフトする。一方、温度下降の場合は、これと逆の波長シフトとなる。すなわち、式(8)および式(9)の値が等しくなるように、各パラメータを設定する、つまり材料を選択することにより、温度変化の影響は歪測定に反映されなくなり、測定対象の歪のみを測定する温度補償歪センサが実現される。

そこで、求めた理論式より材料選択に関する検討を行う。式(9)より、本研究で提案する温度補償法において重要なポイントとなるパラメータは L_1, S_1 であると考えられる。つまりサイズ設定が検討項目となる。波長シフト λ_{strain} に影響があるという意味では線膨張係数 α も同様であるが、センサの要求条件であるサイズの小型化という意味で重要なパラメータとして L_1, S_1 といったサイズに関する変数を挙げた。また、線膨張係数 α は材料物性であり変更がきかないため温度変化に伴う波長シフト λ_T を有効に打ち消すような材料を探すことが困難であると判断したことも理由のひとつである。

温度補償部材の最適サイズは以下の式を用いて求める。

$$f = (\lambda_T - \lambda_{\text{strain}})^2 \quad (10)$$

式(10)は、誤差の 2 乗を示す式である。つまり、式(10)を最小にするような断面積及び長さ、歪による波長シフトと FBG の温度依存性による波長シフトのバランスを最適化する温度補償部材のサイズということになる。しかし、温度補償部材のサイズはセンサベースのサイズによって制限される。したがって、そうした制約条件かで最適サイズを決定する必要がある。実際の試作では、式(10)から、この値が最小となるような温度補償部材の断面積と長さを求め、試作品の温度補償部材のサイズを決定した。

3. 試作と実験による検証

3. 1 二点支持型 FBG 歪センサの試作

本研究で提案するプレテンションを利用した二点支持型 FBG 歪センサの性能評価を目的として、実際にこれの設計・製作を行った。

試作する FBG 歪センサでは、圧縮方向の歪の測定を可能にするため、センサベースを用いて FBG にプレテンションをかける。本研究では、測定対象に生じる歪を最大で $1000 \mu\epsilon$ と仮定し、FBG にプレテンションをかける。FBG に生じる歪に対する波長シフト量は、歪 $1 \mu\epsilon$ あたり 1.2 pm であることから、このときのプレテンションは、約 91.5 g で波長シフトにして 1.2 nm にあたる。実際の FBG 歪センサの製作にあたってはこの値を目安にプレテンションをかける。

プレテンションをかける方法は、まずセンサベースを微小に曲げた状態を作り、これに光ファイバを接着する。この曲げ状態を伸ばし、測定対象に取り付けることによって、FBG にプレテンションをかけた。このとき、センサベースの曲げ量とファイバの伸長の関係を計算することにより、プレテンションを調整することが可能となる。また、センサベース製作に当たって要求される条件は以下の三点である。

- ① 小型であること
- ② センサベースと FBG の歪の一致
- ③ 測定対象の変化と同様に変形する正確な追従性

以上の条件を満たすセンサベースの材料を決定するため、選択基準として剛性比を用いた。剛性比は次式より求めた。

$$R_A = \frac{E_B S_B}{E_A S_A} \quad (11)$$

$$R_O = \frac{E_B S_B}{E_O S_O} \quad (12)$$

ただし、 R_A, R_O はそれぞれセンサベースと測定対象、センサベースと光ファイバの剛性比を示し、 E_B, E_A, E_O はそれぞれセンサベース、測定対象、光ファイバのヤング率である。また、 S_B, S_A, S_O はそれぞれセンサベース、測定対象、光ファイバの断面積を示している。

センサベースは、測定対象の物理的変化を正確に捉える、すなわち測定対象と同様の変形をする正確な追従性を持たなければならない。したがって、式(11)で表される剛性比は、できる限り小さいことが求められる。一方、センサベースと光ファイバの剛性比については、センサベースと FBG の歪は一致しなければならない。したがって、式(12)で表される剛性比は 1 よりも大きいことが求められる。

本研究ではセンサベース候補材として、金属材料そして高分子材料(プラスチック)の中からアルミニウムそしてアクリル樹脂、硬質塩化ビニルを選択し、センサベースとしてどの材料が最も適しているかを検討した。

候補材のひとつであるアルミニウムについては光ファイバに対する追従性は剛性比が 39.21 と十分となった。しかし、部材に対する剛性比が他の 2 つの候補材と比較してかなり大きくなり、つまり部材の物理的変形に対してアルミニウムは硬すぎるため十分な追従性を得ること

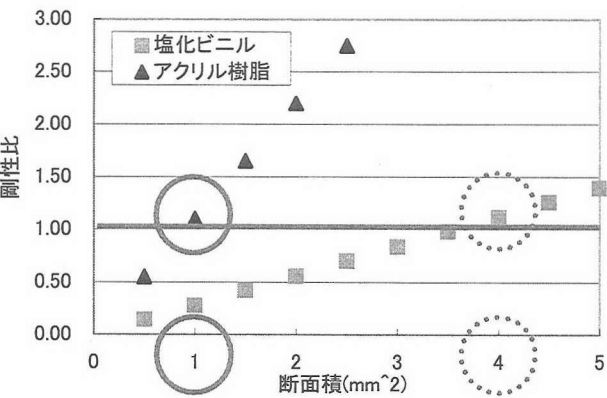
ができず、センサベースとして不適格であると考えられる。

そこで、図－6、図－7には塩化ビニルとアクリル樹脂のみ比較した結果を示す。まず、式(12)で与えられる剛性比は1以上でなければならないことから、図－6よりアクリル樹脂の方が塩化ビニルに比べて断面積を小さく、すなわちコンパクトにセンサベースの製作が可能であることがわかる。一方、式(11)で与えられる剛性比はできる限り小さいことが望ましいことから、図－7よりアクリル樹脂の方が塩化ビニルに比べて測定対象の物理的変化を正確に捉える追従性を持たせたセンサが実現できることがわかった。

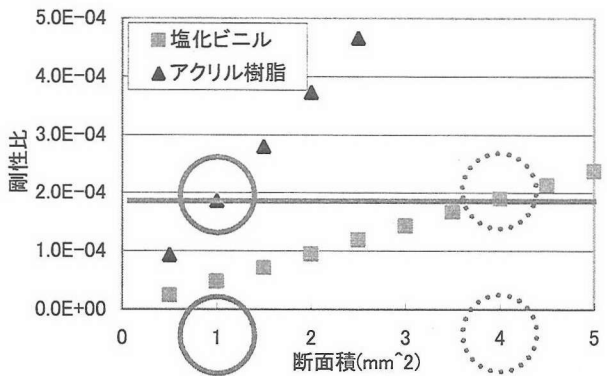
以上のことを踏まえ、本研究ではアルミニウム、アクリル樹脂、塩化ビニルの3種類の材料について検討を行った結果、アクリル樹脂の利用が望ましいと考え、これを材料としたセンサベースを試作した。

実際に製作したFBG歪センサのサイズは長さ40 mm×幅20 mm×厚さ0.5 mm、二点支持間隔20 mmで製作する。この二点支持間隔は、FBGの長さ(10 mm)および温度補償部材の光ファイバ長手方向への長さ(4.3 mm)を考慮し、二点支持間には最低でも18mm以上の間隔が必要と判断し二点支持間隔は20 mmに設定した。

また使用したFBGセンサはヤング率7455 kg/mm²、クラッド半径62.5 μm(被覆を含む場合75 μm)である。



図－6 光ファイバとセンサベース候補材の剛性比



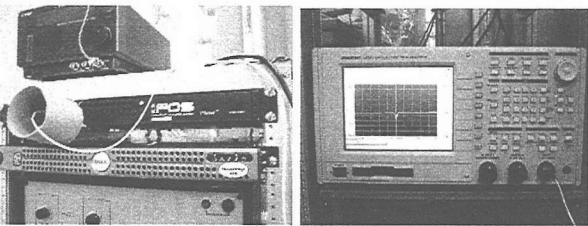
図－7 アルミニウムとセンサベース候補材の剛性比

3. 2 歪計測試験

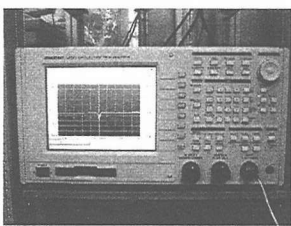
設計に基づいて試作したFBG歪センサを評価するため、性能評価試験を行った。評価試験は、試作したFBG歪センサを用いて実際に歪測定を行い、理論値と比較することにより設計通りに歪測定を行えるか検討した。

試験装置の構成を以下に説明する。アルミニウム製の試験片(長さ1000 mm×幅25 mm×厚さ3 mm)に試作したFBG歪センサをその中心に接着し、歪計測を行った。図－8に光ファイバの光源を、データ収録装置には図－9に示すような光スペクトラムアナライザを使用した。

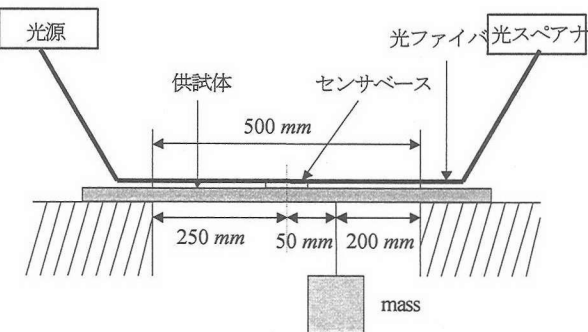
次に評価試験方法について説明する。歪計測は、供試体を両端単純支持に設置した梁に対して行い、引張歪と圧縮歪の2種類を測定した。測定方法は、供試体のセンサ側表面を下向き(地面側)にすることにより引張歪を、逆にセンサ側表面を上向きにすることにより圧縮歪の測定を試みた。また、歪の大きさは、自重による分布荷重およびmassをぶら下げることによる集中荷重50 g、100 g、150 g、200 gをかけることにより変化させ、これら5つの荷重状態において、中心波長をそれぞれOSAで測定した。さらに、試験終了後、FBG歪ゲージの接着状況の確認を行うため中心波長を測定し、再度の利用にセンサが耐え得るかどうか確認した。図－10に試験装置の概要を、図－11に試作したFBG歪センサ(測定対象に接着状態)を示す。



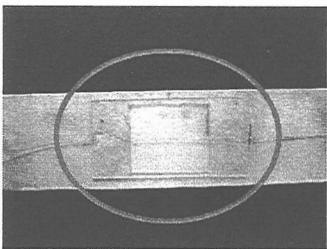
図－8 光源



図－9 光スペアナ



図－10 性能評価試験装置の概要



図－11 試作したFBG歪センサ

アルミニウム板に生じた歪の理論値と測定値の比較を行い、これについて考察する。図-12に比較結果を示す。これは、50 g ごとの荷重変化に対する歪変化量を比較した結果である。

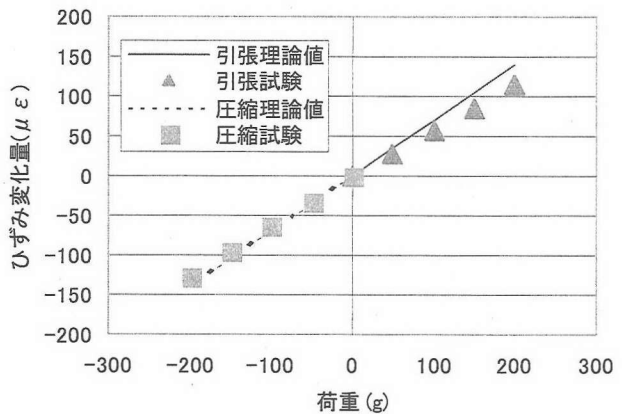


図-12 荷重変化に対する歪変化量の関係

本試験では 50 g の荷重変化を供試体に 200 g まで加えているが、この荷重変化によって生じる歪は同様の値をとらなければならない。このことは、実際に求めた理論値からも確認できる。本試験で試作した FBG 歪センサは、厳密な製作工程を経て製作したわけではないため、測定値と理論値に誤差が生じてしまうことは避けることができないと考えられる。しかし、測定対象に生じる歪を正確にとらえる追従性はセンサにとって絶対になくはない機能である。図-12より理論値と誤差があるものの、理論値と同様に線形に変化していることがわかる。つまり、試作した FBG 歪センサは 50 g の荷重変化に対して常に同じ歪量を測定しているということを意味している。引張歪および圧縮歪双方において 50 g の荷重変化によって生じる歪は、前者で $28.33 \mu\epsilon \sim 30 \mu\epsilon$ (最大 $1.67 \mu\epsilon$ の変動)、後者で $-30 \mu\epsilon \sim -33.33 \mu\epsilon$ (最大 $3.33 \mu\epsilon$ の変動) となり、この試験で確認した範囲の歪計測ではほぼ一定となっていることがわかる。

また、試験終了後、FBG 歪センサの接着状況の確認を行うため中心波長を測定したところ、試験開始時とほとんど変化していないことがわかった。このことからこの FBG 歪センサが再度の利用に耐え得るということが確認された。

3. 3 温度補償機能の実装実験

前節にて検討を行った温度補償機能を実際に試作した FBG 歪センサに実装し、冷却実験及び歪計測実験を行い、その効果に関して検討を行った。

- ① 温度補償機能非実装センサによる冷却実験
- ② 温度補償機能実装センサによる冷却実験
- ③ 温度補償機能実装センサによる歪計測実験

実験①では、冷却によってアルミニウムに生じる歪の理論値と測定値の差から FBG センサの持つ温度依存性

の歪計測に対する影響について知ること、実験②では理論的に検討した温度補償機能の有用性について実証することを目的とする。実験③では温度補償機能の実装が歪計測に対して及ぼす影響について検討を行う。

実験装置の構成を説明する。使用する FBG 歪センサは性能評価試験時と同様のもので、アクリル樹脂を利用し、サイズも同じものを製作した。実験②では、この FBG 歪センサに、硬質塩化ビニルを用いて製作した温度補償部材を接着し、温度補償機能を実装した(図-13)。この温度補償部材のサイズは、2.4節における計算に基づいて $4.3 \text{ mm} \times 10.6 \text{ mm}$ とし、温度補償機能実装 FBG 歪センサを製作した。実験①及び②で利用した実験装置の概要を図-14に示す。この実験装置を使用し、アルミニウム平板の冷却を行い、ある程度温度変化が小さくなったところでアルミニウム平板の温度、FBG の中心波長をそれぞれ測定する。実験③では、性能評価試験と同様の実験装置を用いて歪計測実験を行った。

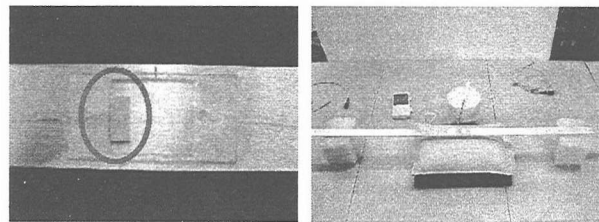


図-13 温度補償機能 図-14 冷却実験

実験①の温度補償機能非実装 FBG 歪センサを用いた冷却実験の実験結果および実験②の温度補償機能実装センサによる冷却実験の実験結果を図-15に示す。これは温度補償なしの場合の測定値および温度補償ありの場合における波長シフトの理論値と測定値を比較した結果である。冷却実験は温度補償ありの場合、温度補償なしの場合、それぞれ3回の実験結果をプロットする。ただし、実験②の結果に関しては補正值を示した。本実験では温度補償部材として硬質塩化ビニルを利用したが、測定対象であるアルミニウム板と温度差が生じてしまった。図-15にはこの温度差を補正した結果を示した。

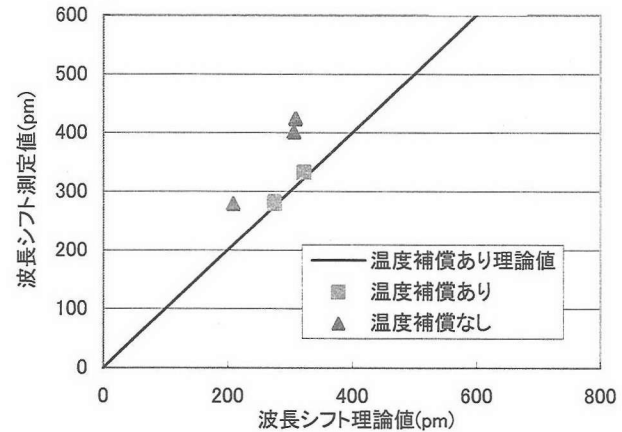


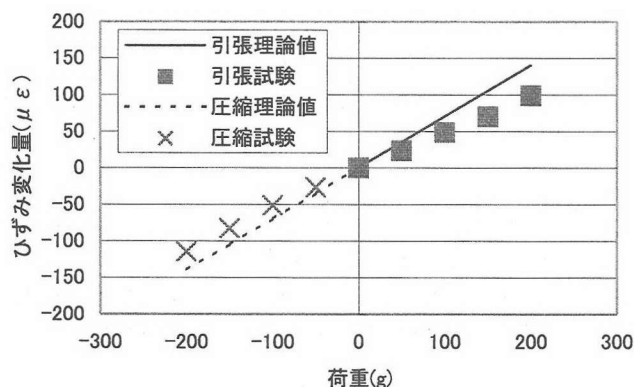
図-15 温度補償機能の実装実験

図－１５より得られた結論を以下に示す。

- FBG センサの温度依存性を確認することができた。また、歪計測に与える影響が非常に大きく、温度補償機能が FBG センサを利用した歪計測において非常に重要であることがわかる。
- 本研究で提案した温度補償機能を実装することにより、FBG センサの温度依存性の影響を受けることなく歪を正確に測定できていることがわかる。誤差は最大で 9 pm、歪にしてわずか $7.5 \mu\epsilon$ の誤差となっている。このことは、提案する温度補償部材を用いた温度補償法の有用性が示された結果であるといえる。

一方で、温度補償部材と測定対象の温度差により温度補償が不十分になってしまうという問題点も同時に明らかになった。これは、材料の熱伝導率の問題であると考えられ、冷却時間が長くなればなるほど温度補償の効果は向上するものと考えられる。しかし、実際の利用にあたって、このような不確定性の高いセンサは実用性の低いものになってしまう。このことから熱伝導率を考慮に入れ温度補償部材の材料選択を行う必要があると考えられる。

最後に、実験③温度補償機能実装センサによる歪計測実験の実験結果を図－１６に示す。



図－１６ 温度補償した際の歪変化量

図－１６において、理論値の直線が線形であるのに対して、測定値(引張及び圧縮)が非線形になっていることが読み取れる。このことから、測定対象に生じる歪変化に対するセンサの追従性に誤差が生じていることがわかる。この誤差は、性能評価試験においては最大で $3.33 \mu\epsilon$ の誤差であったが、本実験においては最大で $6.67 \mu\epsilon$ もの誤差を生じている。前者の誤差に関しては、波長シフト量を比較してみると $0.002 \sim 0.008 \text{ nm}$ 程度とほとんど差がなく、計器の誤差の範囲内と見て問題ないと考えられる。一方、後者の誤差に関しては、歪変化の上昇傾向が顕著になって現れている。つまり、歪計測に対して温度補償部材による影響があることを意味している。したがって、

温度補償部材の設置方法、設置位置などにより測定誤差にどのような影響をおよぼすかを特定し、最適な実装方法を検討する必要がある。

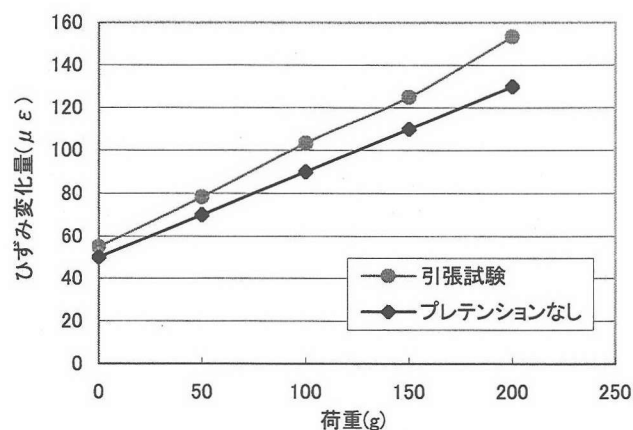
3. 4 接着剤の影響

これまでの実験を通して本研究における歪計測に関する提案手法、及び温度補償に関する提案手法は非常に有用なものであることが実証できたと考えられる。その一方で、改善すべき点もまた明らかになった。

センサにおいて特に重要な点は、等荷重に対してセンサの出力(測定値)が常に一定となることである。温度補償機能実装時の歪計測に関する実験では、自重から 50 g ごとに荷重を変化させているので、これに伴う出力は常に一定となるべきである。しかし、実験③「温度補償機能実装センサによる歪計測実験」において、明らかに 50 g ごとの荷重に対して波長シフトが一定せず、上昇する現象が確認できた。本節はこの誤差要因の特定を目的とする。

本研究において最も有力な誤差の要因は接着部分であると考えられる。接着状況に不具合がある場合、考えられる現象は、光ファイバの接着が不十分ではがれてしまう、または接着状態は良好であるが歪の発生に伴って光ファイバにかかるテンションが変化し、接着剤自体がゆがむ、などが考えられる。

本実験では、これまでの実験とは異なってプレテンションをかけずに歪計測を行った。もし、原因が接着部分にあるならば、プレテンションの影響を無視することはできず、接着のはがれもしくは変形などが起こってしまう。そこで、プレテンションをかけずに荷重を加えることにより、接着剤にかかる負担を減らし、変形等による誤差が起こらないように試みた。したがって、この実験により出力が一定となることを確認できれば、誤差要因として接着部分が有力であることが実証できるものと考ええる。図－１７に温度補償機能実装センサにプレテンションをかけずに行った性能評価試験の結果とプレテンションをかけて行った性能評価試験の結果の比較を示す。



図－１７ プレテンションなしの性能評価試験

図-17よりプレテンションをかけた性能評価試験では出力が線形性を失っているが、プレテンションをかけずに行った試験では線形性を持っていることがわかる。実験では、300 g までの荷重変化に対して追従性を確認することができた。

以上の結果から、前節で確認された 50 g ごとの荷重に対する波長シフトの誤差原因が、接着の影響であることが実証できたと考えられる。また、この結果から温度補償機能として温度補償部材を利用することは、歪計測に対してほとんど影響を与えていないことがわかった。

4. 結論

本研究では、FBG 歪センサにおいて、測定対象への取り付けに伴って引き起こされる出力の不安定化を防ぐことを目的とした新しいセンサ機構を提案した。これを実現することを目的として実際にプロトタイプを設計・製作し、歪計測実験を通してその性能評価を行った。また、FBG センサを利用した歪計測に必要な不可欠な温度補償機能に関する検討を行い実装実験による評価を行った。スマート構造を念頭にいたセンサ材には、様々な要求がなされるが、特に重要な要素としてセンサデバイスの扱いやすさとシステムのシンプルさを挙げることができる。この観点から本研究の目指す FBG 歪センサは重要な意味を持つ。

以下に本研究で得られた結論を示す。

- ・ センサベースを用いることにより、FBG センサに容易にプレテンションをかけることが可能となった。
- ・ センサベースを用いることにより、FBG センサの二点支持での測定対象への接着が可能となった。結果として、FBG センサの出力である反射波長に不均一な圧力がかかることを避けることが可能となった。
- ・ FBG センサにプレテンションをかけることにより圧縮力による歪も測定が可能となった。
- ・ 試作した FBG 歪センサが、本研究で実験を行った範囲内で生じる歪変化を正確に捉える追従性を持っていることを確認した。これにより「プレテンションを利用した二点支持型 FBG 歪センサ」が十分に実現可能であることを実証できたと考えられる。
- ・ 本研究で提案した熱膨張を利用した温度補償法は、FBG センサの温度依存性の影響をほとんど除去することのできる非常に有用な補償法であることが実験的に実証された。
- ・ 接着剤が歪計測に対して影響があることを確認した。
- ・ 試作した FBG 歪ゲージは十分に再度の利用に耐えられることがわかった。

以上、提案手法の有用性を述べたが次に示すような課題もまた有している。

- ・ センサベース材料の再検討の必要性。つまり、測定対象とセンサベースおよび光ファイバとセンサベースの剛性比の適正な値を決定することにより測定精度を向上させることができるものと考えられる。
- ・ 接着方法の再検討の必要性。特に接着剤の選択に関しては測定精度を向上させる上で重要な意味を持つ。
- ・ 本研究で温度補償材料として利用した硬質塩化ビニルは水分吸収により熱膨張係数が変化する。製品化するにあたっては、耐水性の高いプラスチック、あるいは金属材料を利用する必要がある。

以上、本研究に対する課題を列挙したが、特に問題となる点は接着方法にあることがわかった。歪計測の際、接着剤は非線形な変形をしているものと考えられる。本研究では、瞬間接着剤を用いたが、実用的には紫外線硬化型接着剤等、せん断強度の高いものを利用することが必要である。

参考文献

- 1) 影山和郎, “知的構造材料の最近の話題 ヘルスマニタリング,” 材料科学, Vol.36, No.6, pp.315-319, 1999
- 2) Mita, A., Okada and Y. Yamamoto “Emerging Needs in Japan for Health Monitoring Technologies in Civil and Building Structures,” Proc. Second International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Sept, 8-10, pp.56-67, 1999
- 3) 江川幸一, “材料と構造の新しい展開-知的材料・構造について,” 鉄と鋼, Vol.80, No.5, pp.N222-N227, 1994
- 4) 松崎雄嗣, “スマート構造とその周辺” 日本機会学会誌, Vol.102, No.102, pp.2-5, 2000
- 5) Andreas Othonos, Kyriacos Kalli, Fiber Bragg gratings fundamentals and applications in telecommunications and sensing, Artech House, 1999
- 6) Brian Culshaw, John Dakin, Optical Fiber Sensors Volume Three, Artech House, 1996
- 7) 布下正宏, 久間和生, 光ファイバセンサ 基礎と応用, 情報調査会, 1985
- 8) M.G.Xu, H.Geiger and J.P.Dakin, “Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing,” ELECTRONICS LETTERS 18th, Vol.32, No.2, 1996
- 9) Xu, M.G., et al, “Thermally-compensated bending gauge using surface mounted fibre gratings,” International Journal of Optoelectronics, Vol.9, pp. 281-283, 1994
- 10) 岡部洋二, 田中伸拓, 武田展雄, “複合材料特性を利用した FBG 温度補償型歪計測システム,” 構造強度に関する講演会, Vol.44th, pp.182-184, 2002

(2003 年 4 月 18 日 受付)