

FBG センサーアレイによる温度および歪計測

河本 眞司 (ネオラクス)

Temperature and Strain Measurement with FBG Sensor Array

Shinji Kawamoto (NeoLux Inc.)

The accuracy of the capillary FBG temperature sensor, i.e., the bare FBG sensor inside a capillary, and the polyimide recoated FBG sensor were verified experimentally. Though the accuracy of the polyimide recoated FBG sensor is about three times worse than the capillary FBG temperature sensor, it can be applicable for industrial purpose with the 2nd order wavelength-temperature conversion. Moreover the effect of the polyimide layer to the coefficient of the linear conversion constant was explained theoretically.

キーワード：FBS センサーアレイ，ポリイミド再コート FBG，光ファイバー，温度計測，歪計測

(FBG sensor array, polyimide recoated FBG, optical fiber, temperature measurement, strain measurement)

1. はじめに

光ファイバーによる歪，変位あるいは温度のセンシング技術として，SOFO (Surveillance d'Ouvrages par Fiber Optiques) 方式⁽¹⁾，BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) 方式⁽²⁾，FBG (Fiber Bragg Grating)方式⁽³⁾などが開発・応用されてきた。近年，歪測定精度，サンプリング周期の改良，あるいは低価格化の努力により，FBG-IS(FBG-Interrogation System)による温度や歪計測への応用が進展している。特に，大規模構造物の長期的な静的歪や動的歪のモニタリング⁽³⁾⁽⁴⁾，風車やタービンに代表される機械装置の動的歪や数十 KHz に及ぶ機械振動のモニタリング⁽⁵⁾，あるいは劣悪環境下における微小スペースでの温度計測など，電気式の温度・歪計測に比較して FBG-IS の特徴が発揮できる分野での応用が顕著である。

電気式の温度・歪計測に比較した FBG-IS の応用上の最大の特徴は，数キロから数十キロという長距離に渡る数十点から数百点という多数の FBG センサー信号を，FBG-IS と OSW(Optical Switch:光スイッチ)のみを使用してパソコ

ンにより制御・収集できることにある。このため，一計測点当たりの単価上昇を抑制しながら，ロバストでメンテナンス性にも優れた大規模なシステムを比較的容易に構築することができる。例えば，図 1 に示すように，OSW, FBG-IS を組み合わせて大規模なシステムを冗長化して信頼性を向上したり，さらに OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)を用いた防災システムを組み合わせることで冗長化を図りつつ，メンテナンス性も改善した複合システムによりトータルコストダウンを図ったり，という具合に様々な工夫が考えられよう。

しかしながら，FBG センサーは未だ高価であり，FBG-IS を普及させるためには，FBG センサーのコストダウンが急務と考えられる。近年，FBG アレイの自動生産システムが開発される⁽⁶⁾など，FBG センサーのコストダウンに向けた開発が進められている。本論文では，組み込み用 FBG センサーあるいは FBG センサーアレイとして，取り扱いが簡単でコストダウンが計れると考えられる PI (Polyimide: ポリイミド)再コート FBG センサーについて，温度センサーとしての特性を中心に，実験と理論を併用して考察する。

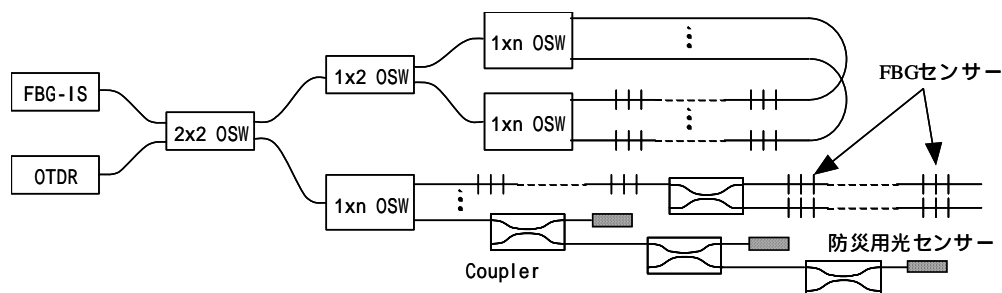


図 1 OSW, FBG-IS および OTDR を用いた大規模計測システム

Fig.1 Large-scale system with OSW, FBG-IS and OTDR

2. FBG-IS システム

図 2 および図 3 に示すドイツ AOS 社製 AWE-CCD シリーズ⁽⁷⁾の FBG-IS を使用して計測を行った。LED からの出力光は Coupler により、AWE-CCD シリーズ内部に設けられた Calibrator へ向かう光と、FBG センサーへ向かう外部出力光に分岐される。Calibrator では精密に温度制御された FBG により常に一定波長の光が反射され、Collimator および回折格子を經由して CCD に戻る。外部温度変化等起因して発生するシステムの波長シフトは、必要に応じてこの反射波長を基準に Calibration される。

AWE-CCD シリーズには、850nm 帯の LED を用いたシステムと 1550nm 帯の LED を用いたシステムがある。また、1 本の光ファイバー計測ラインに、最大 32 個の FBG センサーまで接続可能になっている（PC 内臓タイプでは 64 個の FBG センサーまで接続可能）。

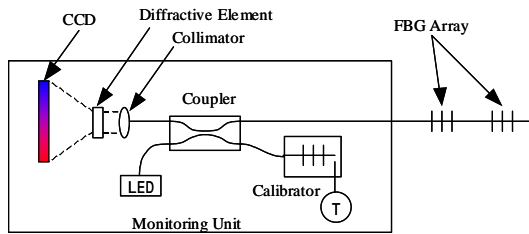


図 2 FBG-IS 概要 (AWE-CCD シリーズ)

Fig. 2 Outline of FBG-IS (AWE-CCD Series)

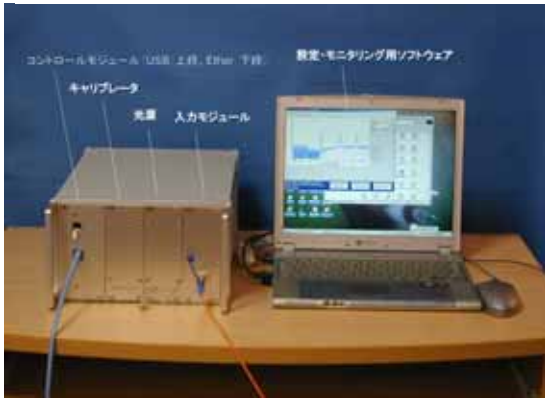


図 3 AWE-CCD シリーズ FBG-IS (850nm LED)

Fig. 3 AWE-CCD Series FBG-IS (850nm LED)

3. PI 再コート FBG 温度センサーの物理モデル

FBG からの反射光の波長である Bragg 波長は次式で表わされる。

$$\lambda_B = 2nd \quad (1)$$

ここで、 n は伝播モードの実効屈折率、 d は Bragg Grating の間隔である。したがって、Bragg 波長は温度変化による伝播モードの実効屈折率の変化、熱膨張による格子間隔の変化、および FBG に働く軸応力による格子間隔と屈折率の変化の影響を受け、その波長シフトは次式で表わされる。

$$\frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \alpha_S \right) \delta T + G_F \varepsilon_S \quad (2)$$

ここで、右辺第一項は光ファイバーの thermo-optic 係数であり、FBG 温度センサーの波長シフトに対して最も影響力が大きい項である。(2)式の各記号は以下の意味を持つ。

α_S : FBG の線膨張係数

δT : 温度変化

ε_S : 応力による FBG の歪

G_F : 波長 - 歪変換の比例定数 ($=1-p_e$, p_e は光弾性係数)

PI 再コート FBG の物理モデルを図 4 に示す。図中の A 、 E および α は、それぞれ断面積、ヤング率および線膨張係数を表わし、また添字 s は FBG を、 p は PI を表わす。PI のガラス転移温度 T_g は 300 以上と高温であるため、 T_g から室温付近までの冷却過程で、PI 再コート層に引張応力が、また FBG に圧縮応力が発生している。FBG 軸方向の力のバランスおよび光ファイバーと PI の歪が等しいことから次式が成り立つ。

$$\sigma_S A_S + \sigma_P A_P = 0 \quad (3)$$

$$\alpha_S \delta T + \frac{\sigma_S}{E_S} = \alpha_P \delta T + \frac{\sigma_P}{E_P} \quad (4)$$

ここで、 s および p は、それぞれ FBG および PI の軸方向応力を表わす。(3)式および(4)式から、PI 再コート層の存在により発生する FBG の歪は、温度変化に比例し、次式で表わされることがわかる。

$$\varepsilon_S = \frac{\gamma E_P}{E_S + \gamma E_P} (\alpha_P - \alpha_S) \delta T \quad (5)$$

よって、PI 再コート FBG の波長シフトは温度変化に比例し、次式で表わされる。

$$\frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \alpha_S + G_F \frac{\gamma E_P}{E_S + \gamma E_P} (\alpha_P - \alpha_S) \right\} \delta T \quad (6)$$

Corning 社製光ファイバー-SMF28 では、

$$\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \alpha_S \approx 6.7 \times 10^{-6} [1/K] \quad (7)$$

である。また、PI 再コート層厚み $14.5 \mu\text{m}$ 、 $E_S=72\text{GPa}$ 、 $E_P=3.5\text{GPa}$ 、 $s=0.6\text{ppm}$ 、 $p=15\text{ppm}$ 、 $G_F=0.78$ を使用すれば、

$$G_F \frac{\gamma E_P}{E_S + \gamma E_P} (\alpha_P - \alpha_S) = 0.3 \times 10^{-6} [1/K] \quad (8)$$

となり、裸の FBG センサーの比例定数に比較して PI 再コート FBG センサーのそれは 4%程度増加することになる。

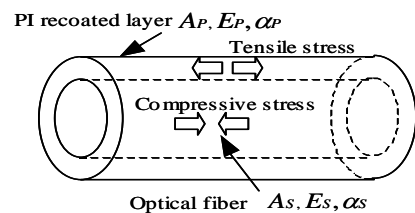


図 4 PI 再コート FBG の物理モデル

Fig. 4 Physical model of PI recoated FBG

4. 実験および考察

4.1 実験装置および実験方法 本実験では、約10cm 角の恒温槽を定電力で一定温度に安定させた後、恒温槽の中心に設置した FBG センサーの波長を、近接して設置した検定済み標準温度計の読み取り値と比較することにより行った。また、FBG センサーに応じて 850nm 帯と 1550nm 帯の LED を用いた 2 台の AWE-CCD シリーズを用いて実験を実施した。温度センサーとしては、ステンレスチューブの中に裸の FBG をストレスフリーの状態に挿入した反射波長 825nm の AOS 社製キャピラリー温度センサー（図5 参照）、および厚み 14.5 μ m の PI 再コートをした 1550nm 帯の汎用 FBG センサーを使用した。



図5 外形 0.5mm のキャピラリー温度センサー
Fig.5 Capillary temperature sensor with 0.5mm⁰D.

4.2 キャピラリー温度センサーの実験結果 図6 に 10 ~ 90 の温度範囲におけるキャピラリー温度センサーの測定誤差を示す。図中の、線形 (Linear) 変換温度および 2 次精度 (2nd order) 変換温度は、(6) 式をベースに次式により、測定波長 λ から温度 T_λ への変換を行ったものである。

$$T_\lambda = \frac{\lambda - \lambda_R}{T_C \lambda_R} - T_{C2} \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \right)^2 + T_R \quad (9)$$

ここで、 λ_0 は、2 次曲線の対称軸に相当し、次式で求める。

$$\lambda_0 = \lambda_R \{ 1 + T_C (T_0 - T_R) \} \quad (10)$$

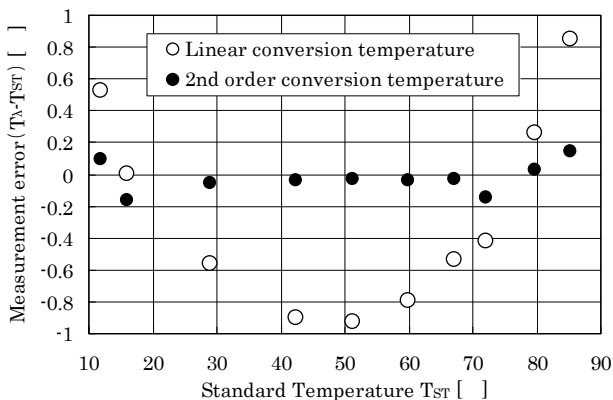


図6 キャピラリー温度センサーの測定誤差
Fig.6 Measurement error with capillary sensor

表1 キャピラリー温度センサーの変換パラメータ

Table 1 Conversion parameter of capillary sensor

	T_C	λ_R	T_R	T_{C2}	T_0
Unit	[1/]	[nm]	[]	[]	[]
Linear	6.7×10^{-6}	825.102	20.8	0	0
2nd order	6.7×10^{-6}	825.102	21.7	2.4×10^{-7}	47.5

また、波長 - 温度変換に使用した各パラメータの値を表1 に示す。これより、キャピラリー温度センサーの測定精度は、10 ~ 90 の温度範囲において、線形変換温度で ± 1 以内、2 次精度変換温度で ± 0.2 以内であることがわかる。

4.3 PI 温度センサーの実験結果 図7(A)および7(B)に 1550nm 帯域の波長の異なる 2 種類の PI 再コート FBG センサーによる測定誤差を、また波長 - 温度変換に使用した各パラメータの値を表2(A)および2(B)に示す。これより、PI 温度センサーの測定精度は、10 ~ 90 の温度範囲において、線形変換温度で ± 3 以内、2 次精度変換温度で ± 0.5 以内であることがわかる。線形の比例定数 T_C をキャピラリー温度センサーに合わせた場合でも、他のパラメータの調整により同程度の誤差に抑制できるが、ここでは (8) 式を重視して T_C 値を設定した。この時 PI 再コート FBG

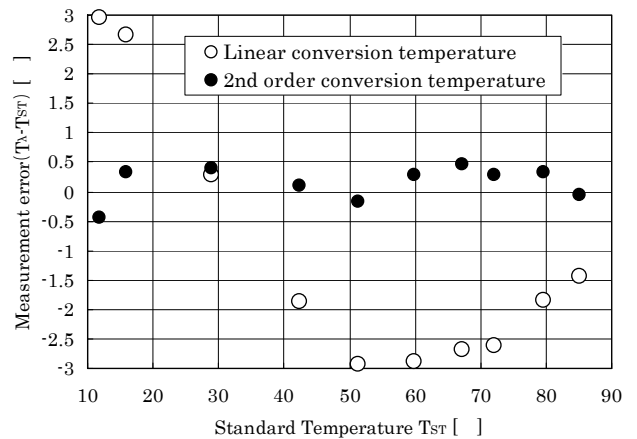


図7 (A) 波長 1557nm の PI 温度センサーの測定誤差
Fig.7 (A) Measurement error of wavelength 1557nm PI sensor

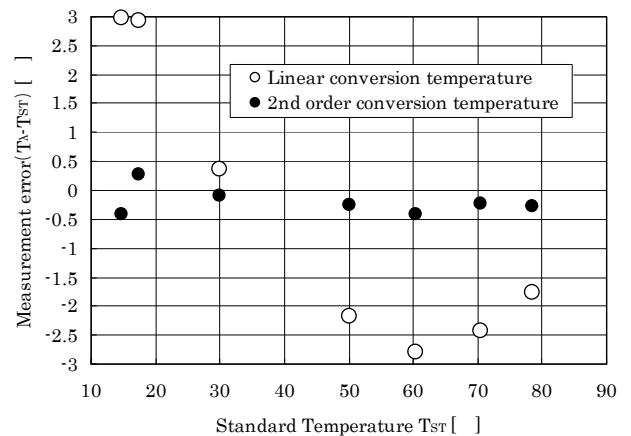


図7 (B) 波長 1533nm の PI 温度センサーの測定誤差
Fig.7 (B) Measurement error of wavelength 1533nm PI sensor

表 2(A) 波長 1557nm の PI 温度センサーの変換パラメータ
Table 2(A) Conversion parameter of wavelength1557nm PI sensor

	T_C	λ_R	T_R	T_{C2}	T_0
Unit	[1/]	[nm]	[]	[]	[]
Linear	7.0×10^{-6}	1556.826	18.4	0	0
2nd order	7.0×10^{-6}	1556.826	21.6	6.6×10^7	60

表 2(B) 波長 1533nm の PI 温度センサーの変換パラメータ
Table 2(B) Conversion parameter of wavelength1533nm PI sensor

	T_C	λ_R	T_R	T_{C2}	T_0
Unit	[1/]	[nm]	[]	[]	[]
Linear	7.0×10^{-6}	1533.05	20.8	0	0
2nd order	7.0×10^{-6}	1533.05	23.2	6.6×10^7	60

センサーでは 50 以下で線形変換温度の誤差が急増することがわかる。この現象は、PI 層のヤング率や線膨張係数の温度依存性だけでは説明できず、温度低下に伴う FBG の圧縮応力の増大による光ファイバーの thermo-optic 係数の変化など、他の要因にも注目する必要があると思われる。いずれにせよ、2次精度変換温度では ± 0.5 以内の精度が得られるため、工業的な応用は十分可能であると考えられる。

5. 温度センサーアレイ設置上の注意点

5.1 自重・摩擦力への配慮 長い FBG 温度センサーアレイを配置する場合は、自重や摩擦力による軸応力に注意する必要がある。FBG センサーアレイを空中に吊り下げる場合、自重の影響による誤差を 0.1 以内にするためには FBG 温度センサーアレイ長は 3m 以内にしなければならない。横に配置する場合は摩擦係数にもよるが垂直配置の約 2 倍の長さまで許容できる。

5.2 キャピラリー温度センサーの曲げ FBG 温度センサーアレイの FBG センサー部は直線使いが原則である。キャピラリー温度センサーにおいて、FBG センサーより先端の任意の部分を曲率半径 R で曲げた場合、曲げモーメント $M=WL$ が発生する。ここで、 W は曲げモーメント

を発生させるために光ファイバーに加わる横荷重であり、 L は加える荷重の間隔である。曲率半径と横荷重との関係は、

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} = \frac{WL}{EI} \quad (11)$$

で表わされる。ここで I は光ファイバーの中立軸に対する断

面 2 次モーメントである。よって荷重間隔 L が小さければ大きな横荷重が加わるため、曲げ方によっては壁面との摩擦力により測定誤差が大きくなるので注意が必要である。

5.3 FBG 温度センサーの両端固定 両端にコネクタを持つ FBG 温度センサーを製作する場合は、FBG に軸応力が加わらないよう両端を固定する必要がある。この際に注意すべき点は、光ファイバーの座屈による軸応力である。両端を固定した場合の座屈荷重は、次式で表わされる。

$$P_{CR} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (12)$$

ここで、 L は両固定端間の距離である。これより、座屈荷重による誤差を 0.1 以内にするためには固定端の距離は 220mm 以上必要であることがわかる。

6. まとめ

代表的な FBG 温度センサーであるキャピラリー-FBG 温度センサーと、FBG センサーとして組み込みが容易な汎用 PI 再コート FBG センサーについて、温度センサーとしての特性を中心に実験・考察を行い、10 ~ 90 の温度範囲において、キャピラリー温度センサーは線形変換温度で ± 1 以内、2次精度変換温度で ± 0.2 以内の測定精度があり、PI 再コート FBG センサーは線形変換温度で ± 3 以内、2次精度変換温度で ± 0.5 以内の測定精度があることを明らかにした。また、PI 再コート FBG センサーの物理モデルにより、波長 - 温度の線形変換における比例定数への PI 層の影響を明らかにした。さらに、温度センサーアレイの設置上の注意点についても考察した。

文 献

- (1) 黒川章二, 羅黄順: 「光ファイバーを用いた断面修復済み鉄筋コンクリート梁の変形計測」, 応用力学論文集, Vol.6 (2003).
- (2) T. Horiguchi, T. Kurashima, and M. Tateda: "A technique to measure distributed strain in optical fibers", Photonics Technology Letters, IEEE, Vol.2 Issue5, pp.352-354 (1990).
- (3) T. Thiel and J. Meissner: "Autonomous Crack Response Monitoring on civil structure with Fiber Bragg Grating displacement sensors", Proc. 17th OFS Conference, Belgium (2005).
- (4) D. Zonta, P. Zanon, M. Pozzi, and T. Thiel: "Development of a FBG-based Dynamic Measurement System for the Real-time Monitoring of RC Elements: Experimental Application to a Smart Beam Specimen, Proc. 3rd European Conference on Structural Control, Vienna, Austria (2005).
- (5) QPS Photonics, "HPS 1600 System Condition Monitoring User Manual", Canada (2008).
- (6) P. Lefebvre, A. Vincelette, C. Beaulieu, and P. Ficocelli, "Automated Manufacturing of Fiber Bragg Grating Arrays" OFS, OSA, paper ThE27, Cancún, Mexico (2006).
- (7) AOS GmbH, "AWE-CCD User's guide", Dresden, Germany (2005).
- (8) M.C.Wu, Pater, R.H. Peter, and S.L. DeHaven: "Effects of coating and diametric load on fiber Bragg gratings as cryogenic temperature sensors", Proc. SPIE, Vol.6933, pp.693303-693303-10, California, USA (2008).

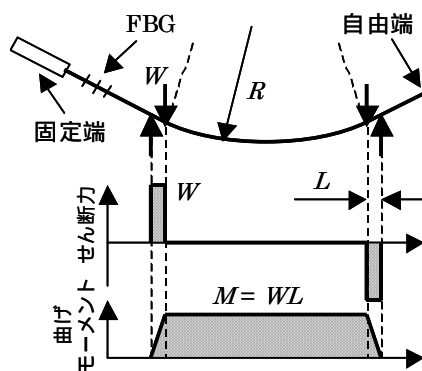


図 8 キャピラリーセンサーの曲げ
Fig.8 Bending of Capillary sensor