

光ファイバーセンサーの 高温材料表面への実装可能性の検討

鈴木宏和 * 西村昭彦 **

光ファイバーは通信ケーブルや、工業・医療用ファイバースコープとして広く利用されている。光ファイバーのもう一つの利用形態は、温度や応力・歪センサーとして利用可能である。これは、FBGセンサーと呼ばれ、実用化されているが、常温域での計測に対応した製品の市販のみに留まっている。本報告では、エネルギーインフラの基盤をなすパワープラント等の常時モニタリングによる安全性担保の目的で高温環境への耐性のあるセンサーや、実装方法の実用化に向け検討したので、その概要を報告する。

キーワード：光ファイバー，FBG，高温環境，温度計測，歪計測，接着

1. はじめに

光ファイバーは、石英を基材とした材料で、情報通信の領域では通信ケーブル、医療・工業の領域ではファイバースコープとして利用されている。

光ファイバーの構造は、Fig. 1 に示す 2 重の石英ガラス構造となっており、中心部のコア部のガラス屈折率を外周部のクラッド部の屈折率より若干大きくすることで、コア部に浅い入射角で侵入した光が、コア部・クラッド部の界面で全反射 (Fig. 2) を繰り返し反射損失が無い状態で遠距離まで伝送が可能となる。この性質を利用し通信ケーブルや、光透過性と、その柔軟性を利用し後者のファイバースコープとして実用化されている。

また、光ファイバーに特殊な加工を施すことで温度センサーや歪センサー (fiber Bragg grating, 以降 FBG センサー) として利用できる。常温域での温度や歪が測定可能な FBG センサーは実用化されメーカーより製品として市販されているが、現在のところ高温領域用 FBG センサーは実用化されておらず、実用化に向け独立行政法人日本原子力研究開発機構レーザー共同研究所 (以降原機構) と共同で、

高温用 FBG センサーの開発、その実装方法の開発を行ったので、ここに報告する

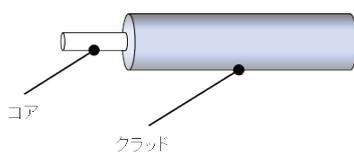


Fig. 1 光ファイバーの構造

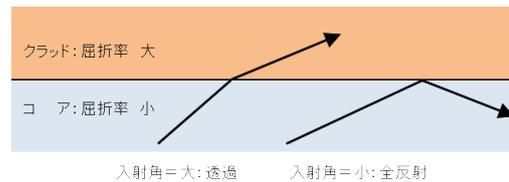


Fig. 2 入射角による境界面での反射状態

2. FBG センサーとは

FBG センサーは、光ファイバーのコア部に一定間隔 (Λ) に回折格子を形成し、広帯域のスペクトルを有した光線を投入すると回折格子部分で干渉し eq. 1 に示すブラッグ波長 (λ_b) の反射光のピーク波長を、透過光については、ブラッグ波長の部分が欠損したスペクトルを観測することが出来る。Fig. 3

$$\lambda_b = 2n\Lambda \quad (\text{eq. 1})$$

ただし、

λ_b : ブラッグ波長 (nm)

n : 光ファイバーコア部の有効屈折率 (-)

Λ : 格子間隔 (nm)

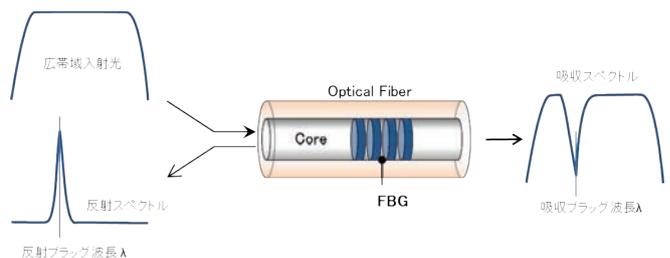


Fig. 3 FBG センサーの測定原理

- | | |
|----|---------------------------------|
| * | 技術研究所 建築生産・設備研究グループ |
| ** | 独立行政法人 日本原子力研究開発機構
レーザー共同研究所 |

ここで、格子間隔 Λ に着目すると、FBGセンサーの周囲の温度環境が変化した場合、FBGセンサーは周囲温度に追従し同じ温度となる。ガラス基材の熱膨張率により Λ が物理的に変化し、観測される λ_b の波長ピークが変化するため、 Λ の変化量を線膨張率で除算すれば温度が測定可能となる。また、FBGセンサーを鋼材などの基材に装着し応力を導入した場合に基材の伸縮に完全に追従し伸縮すれば、温度と同様に λ_b の変化をとらえることが出来、 Λ の変化量に基材である鋼材のヤング率を乗算すれば導入した応力や歪が測定可能となる。

測定対象部材は温度の変化と応力・歪が同時に発生するため、測定対象部位に周囲の鋼材から拘束を受けないFBGセンサーと鋼材から拘束を受けるFBGセンサーを近接し実装し、拘束を受ける λ_b より温度成分を分離することで応力を測定することが出来る。

また、FBGセンサーは光を用いて測定を行うため、熱電対や歪ゲージの様に電氣的なノイズを受けず測定できる点や、光ファイバーの特性である長距離伝送が可能な為、測定部位と計測器間の距離を大きくとることが出来る点、一本の光ファイバーに異なった Λ の回折格子を準備することで多点計測が可能である点を特徴としている。

FBGセンサーは、常温域では実用化され市販されていると前述した。市販されているFBGセンサーは、エキシマレーザーより放射される光を回折格子に通過させ、一定間隔 Λ の干渉光縞にてコア部のガラス組成（コア内の屈折率）を変化させ製作する。このため、高温への耐性が低く100°Cでコア内の回折格子が消失し測定ができなくなることが一般的であり高温環境に耐性をもつFBGセンサーの開発が望まれている。

3. 開発の目的

今回の開発は、発電所の様に高温配管を有する施設で、現在の温度や歪のモニタリングが可能なシステムを構築することを最終目的としている。常時モニタリングは、言い換えれば、非常時の温度変化や歪変化をいち早くとらえることが可能となり、施設の安全運用に寄与するものと考えている。このためには、

500°C程度の高温環境に耐性のある光ファイバーセンサーの開発（温度測定）

500°C程度の高温材料表面への光ファイバーセンサーの実装技術（応力・歪測定）

が必要となる。

前者は、これまでに原機構により、フェムト秒パルスレーザーを用い高強度のレーザーエネルギーで光ファイバーへの回折格子書き込みに成功しており、500°Cの環境下でも、回折格子が消失しないことを確認している。後者は、これまでに、事例報告が見当たらないため、開発の目的は、

- ①温度測定精度を高めること（温度と λ_b の検量線の作成）
- ②高温部材表面への実装技術の開発とした。

4. λ_b と温度の相関（検量線の作成）

FBGセンサーを用いてより精度の高い温度測定を可能とするために、すでに開発したFBGセンサーを小型高温炉の中に応力の拘束を受けない様に設置し、光サーキュレータ（混合・分配器）を介し、温度を変化させ、反射モードのブラッグ波長（ λ_b ）を計測し、温度との相関を調べた。

Fig. 4に測定システムを示す。測定は、室温を初期状態とし、50°Cより500°Cまで50°Cステップで昇温した。各温度ステップで温度が安定した後、熱電対による温度測定（FBGセンサー温度とした。）、光スペクトルアナライザーによりブラッグ波長を測定した。

ブラッグ波長（ λ_b ）は、eq. 1で示される有効屈折率(n)と格子間隔（ Λ ）との積になる。光ファイバーを加温した場合、石英ガラスが線膨張率に従い膨張し、 Λ の間隔が大きくなる。線膨張率は温度の1次関数となる。また有効屈折率も同様に温度の1次関数となる。したがって、eq. 1を温度依存の式に書き換えると、温度の2次式となる。（eq. 2）

$$\lambda_{bt} = 2 \cdot n_0(1 + \alpha t) \cdot \Lambda_{t_0}(1 + \beta t) \propto t^2 \quad (\text{eq.2})$$

ただし、

λ_{bt}	: t[°C]でのブラッグ波長	[nm]
n_0	: t ₀ での屈折率	[-]
α	: 屈折率の温度依存係数	[-]
Λ_{t_0}	: t ₀ での回折格子間隔	[nm]
β	: 石英ガラスの線膨張率	[-]

測定結果をFig. 5に示す。

Fig. 5より、温度とブラッグ波長の間には、近似式 eq. 3

$$\lambda_b = 5.489 \times 10^{-6} \times t^2 + 1.008 \times t + 1539.584 \quad (\text{eq. 3})$$

が得られ、相関係数（R²=0.9998）の高い相関が得られた。これより検量線（eq. 4）を作成し、ブラッグ波長より温度を推定した。

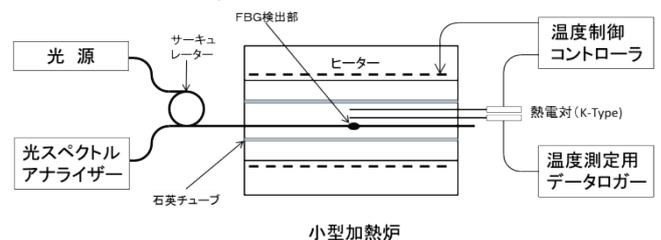


Fig. 4 測定システム

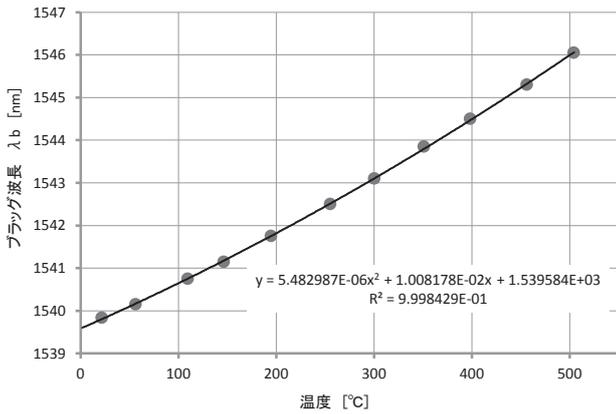


Fig. 5 ブラッグ波長 (λ_b) と温度の相関

$$t = \sqrt{8.452e + 5 + 2.1932e - 5\lambda_b} + 919.37 \quad (\text{eq. 4})$$

eq. 4 で得られた検量線より、λ_b より温度を推定した結果を Table 1 に示す。

この結果より、常温から 500°C の温度範囲で、誤差は概ね 5°C 以内に収まっており、実用上十分な精度で測定可能なことが明らかになった。

ただし、eq. 4 は、異なる Δ で設計された FBG センサーには適用できないので注意が必要である。

Table 1 検量線による測定波長の温度変換

λ _b [nm]	eq. 3 による推定温度 [°C]	測定温度 [°C]	誤差 [°C]
1539.84	25.1	21.7	3.4
1540.15	54.5	56.2	-1.7
1540.75	109.2	109.6	-0.4
1541.15	144.1	146.5	-2.5
1541.75	194.3	194.7	-0.4
1542.50	254.1	255.4	-1.3
1543.10	299.9	300.4	-0.6
1543.85	354.7	351.1	3.6
1544.50	400.4	398.3	2.1
1545.30	454.6	456.2	-1.6
1546.05	503.5	504.4	-0.9

5. FBG センサーの実装方法の検討

前節までで高温環境に耐性のある FBG センサー温度による測定精度が確認できた。FBG センサーは、応力を導入した測定対象物と同じ変位で伸縮することが可能ならば、歪ゲージとして利用できる。そこで、FBG センサーの実装方法を検討することとした。

被測定物への装着は、金属バンド等により対象物間にセンサーを挟み込む機械的方式、溶接や接着による装着が考えられる。

金属バンド等による装着は、容易に装着が可能であるが、配管材料の材質と金属バンドの材質が異なる場合は測定対象の温度が変化した場合、線膨張率の違いにより弛みが発生し、非測定対象物と同じ変位で伸縮できないことが予想され、装着方法としては適切ではないと考えられる。

溶接による装着は、非測定対象金属に溶接歪を原因とした応力集中が発生すると考えられることと、FBG センサーは、非金属であるため直接溶接が不可能であるために実装方法としては適していないと考えられる。

そこで、接着による実装が最も適した手段と考えられるが、瞬間接着剤やエポキシ系接着剤は、有機物を基材としているために、高温環境（目標は 500°C）で炭化し接着材として用いることは不適當である。したがって、1000°C 程度まで接着力の確保ができるセラミックス系接着材を候補に挙げ、接着可能か、応力・歪測定が可能か検討した。

5.1 セラミックス系接着材の選定

セラミックス系接着材は、アルミナやジルコニアなどのセラミックスを基材とし、高温でも用いることができる無機系接着材である。また、基材の種類の違いにより耐熱温度、線膨張率が異なるため、被測定対象物に確実に実装できる接着材を選定する必要がある。

市販されているセラミックス系接着材の耐熱温度と線膨張率の関係を Fig. 6 に示す。

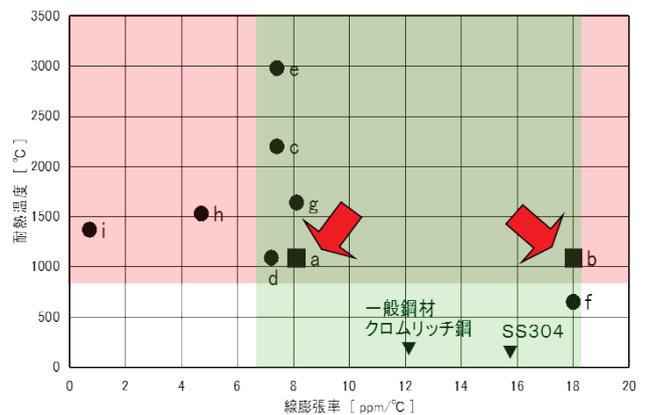


Fig. 6 各種接着材の耐熱温度・線膨張率

パワープラント等で用いられる配管は、クロムリッチ鋼（線膨張率 12×10^{-6} [K⁻¹]) やステンレス鋼（線膨張率 16×10^{-6} ）が多く用いられる。FBG センサーの装着は、配管鋼材と同じ線膨張率を有する接着剤を選定する必要があるが、市販されている接着剤は、鋼材と同じ線膨張率を有する製品がないため、鋼材の線膨張率に最も近い接着剤 a（線膨張率 8.1×10^{-6} ）と接着剤 b（線膨張率 18×10^{-6} ）を選定し装着方法の検討をすることとした。

5.2 高温環境での接着性の確認

セラミックス系接着剤と鋼材の接着性を確認するために、FBGセンサー実装を前提とし、接着剤を用いモールド(Photo.1)を作成し、鋼材に接着し昇温し接着性の目視確認を行った。

モールドとは、光ファイバーが125 μmφであるため、装着時の作業性を考慮し、光ファイバーの周囲を炭化ケイ素(SiC)で筒状に織り上げ(組紐編)、これをセラミックス系接着材を用い固化し20×50×5mmの大きさに成形したものである。ここで、炭化ケイ素繊維を用いた理由は、光ファイバーの保護する為に必要な1000℃程度の耐熱性を持っているためである。(一般的なカーボンを用いた実験を行い、400℃程度で周囲空气中に含まれる酸素で、炭化が加速し劣化したため、炭化ケイ素の採用に至った。)

接着性の確認は、Fig.7に示す、モールドの線膨張率、接着面の線膨張率の組み合わせにより4個のサンプル数を製作し、小型マッフル炉の中に設置し(Photo.2)、400℃まで昇温し、24時間加熱した後、室温まで冷却し接着状況を目視で確認した。



Photo. 1 モールド

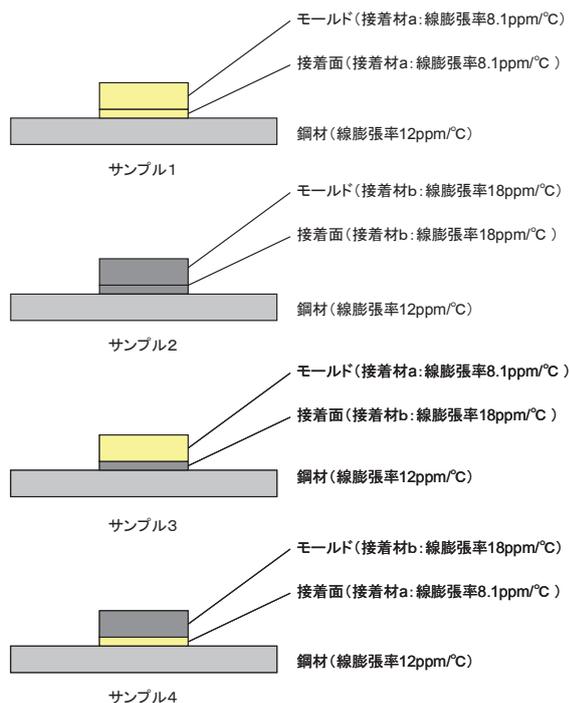


Fig. 7 接着性確認のためのサンプル

試験結果を、Photo. 3, Photo.4に示す。サンプル1, サンプル4は接着面に接着剤a(線膨張率 8.1×10^{-6})を使用している。モールドの線膨張率に関係なく、接着力が確保されず昇温や降温時の鋼材の伸縮に追従できず離脱したものと考えられる。

サンプル2, サンプル3は接着剤b(線膨張率 18×10^{-6})を使用している。接着性が良好と判断されるので、モールド製作材料、被測定面への装着にこれを用いることとした。



Photo. 2 接着性確認試験(小型マッフル炉による昇温試験)



Photo. 3 試験結果(サンプル1, 2)

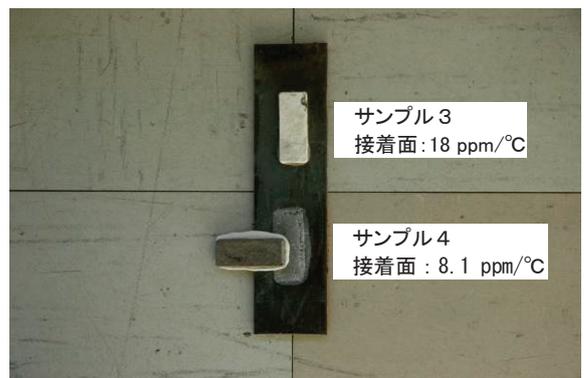


Photo. 4 試験結果(サンプル3, 4)

5.3 応力導入時の接着性の確認

接着材の被測定物に応力を導入した場合の接着性を確認した。前節の試験と本節の試験を合わせ、光ファイバーセンサーの装着法の本質的な部分をなしている。

試験は、20×600×t6の鋼材にモールドを接着し、

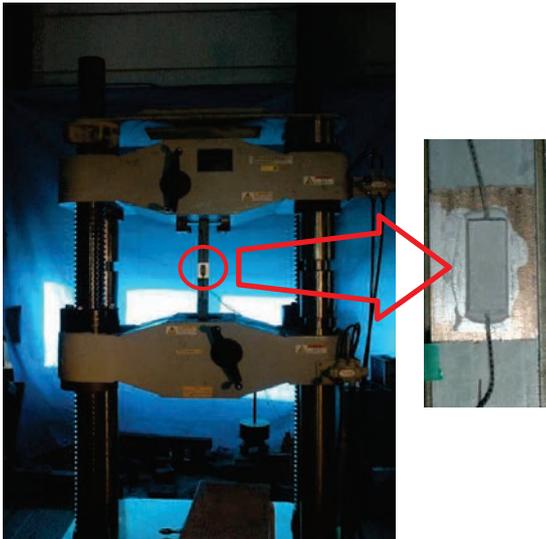


Photo. 5 引っ張り時の接着性確認試験実施状況

Photo. 5 に示すアムスラー試験機にて引っ張り試験を行った。試験は、一般鋼材の弾性比例限界を考慮し 500 - 1,500 [μ Strain] の歪となるように試験機を操作し (Fig. 8), 接着状態を確認した。

Photo. 6 に 10,000 [μ Strain] の応力を短時間導入した後のサンプル状態を示す。鋼材の黒皮が剥離し鋼材が降伏点を迎えた状況でもモールドは強固に接着していることが確認できた。通常、構造体は弾性比例限界 (1,500 μ Strain 程度) で設計されるので、セラミックス系接着剤を用いた FBG センサー実装には、十分な力を有していると考えられる。

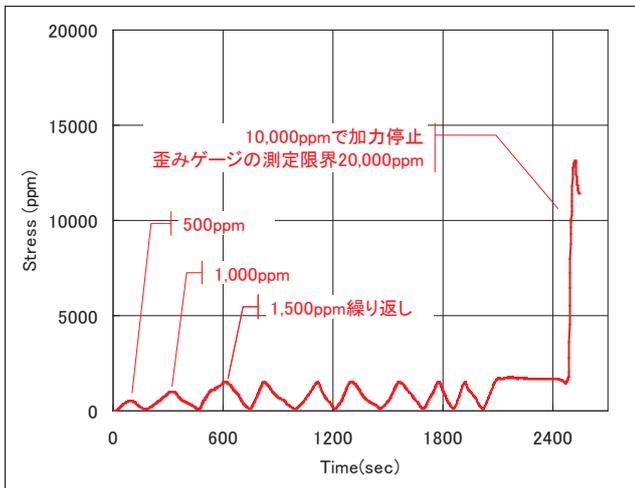


Fig. 8 引っ張り試験での応力導入パターン

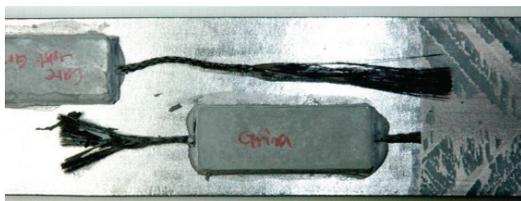


Photo. 6 引っ張り試験後のサンプル

5.4 FBGの実装と高温環境下応力導入試験

前節までに、被測定対象物にモールドを実装し、温度、応力を個別に導入し実装状態を確認した。本節では、モールド内に FBG センサーを設置し、温度と応力を同時に加えた場合、センサーが歪をとらえることが可能か実験を通じ確認した。

Photo. 7 に実験システム全景を示す。小型加熱炉は、曲げ応力導入治具にセットされていることが確認できる。応力導入治具は、Fig. 9 に示す試験用鋼材を 2 点支持できる構造とし、その両端の押しネジを繰り出すことにより曲げ応力を導入できる構造とした。実験は、Fig. 10 に示す加熱を行い、実験ステップで定めた 100°C 毎の温度が安定した時点で、ブラッグ波長、温度を測定した。また、応力導入時の歪量の比較は、鋼材裏面に溶接した高温用歪ゲージにて測定した値を基準値とした。(Photo. 7)

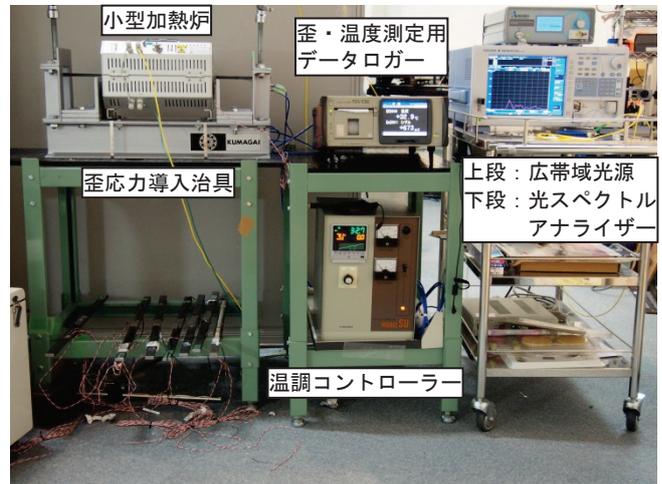


Photo. 7 実験システム全景

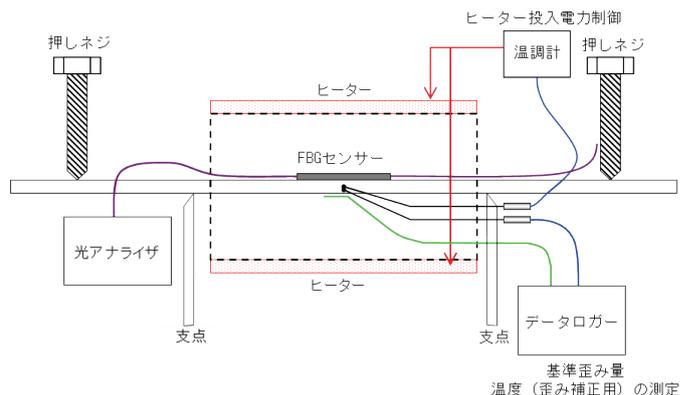


Fig. 9 実験システム

実験結果を Fig. 11 に示す。グラフ横軸は歪み量、縦軸はブラッグ波長である。試験鋼材裏面に溶接した高温用歪ゲージを歪の真値とプロットしているが、非応力導入時の各設定温度でブラッグ波長の変化はとらえられているものの、歪が増大した場合、高温になるに従い、歪とブラッグ波長の相関が平坦になる傾向が測定された。

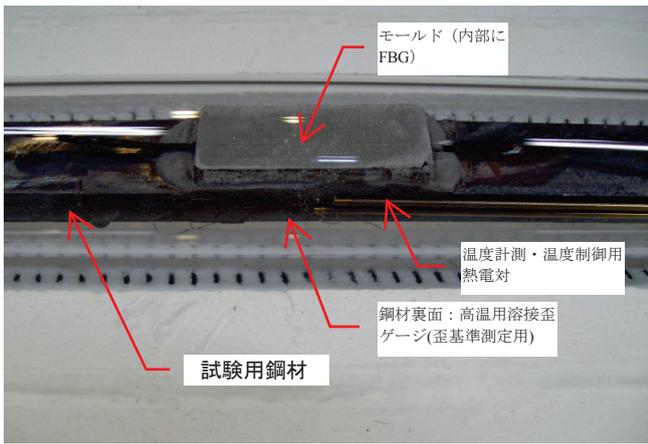


Photo. 8 測定部位の各種センサー位置関係

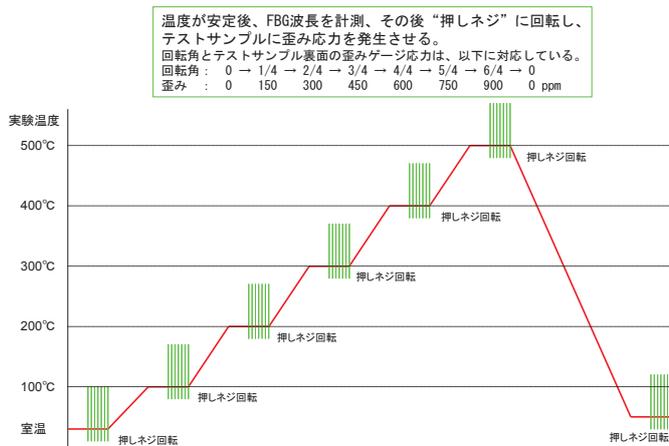


Fig. 10 昇温パターンと計測タイミング

F B Gセンサーは、温度や歪をファイバーの伸びとして測定するので、温度に対しては、その伸びをとらえることが可能であるが、高温になるにしたがい応力導入による伸びをとらえることが出来ないという結論を得る。これは言い換えれば、鋼材～モールド～光ファイバーが一体化していないことが(滑りが発生)原因と考えられる。

5.5 高温時の歪測定の実験

光ファイバーケーブルを再考する。光ファイバーケーブルの構造を、Fig. 12 に示す。石英ガラスからなるコア部、クラッド部とこれらを保護する為のコーティング層からなる。

コート層は、光硬化樹脂を用い形成されている。樹脂は高温状態で軟化もしくは炭化するの、モールドと光ファイバーケーブル石英ガラス部との間に滑りを発生させる原因と考えられる。(Fig. 13) これを解決するためコート層を、工具を用いて削り取り、前節の実験を行った。実験結果を Fig. 14 に示す。

コート層を有する実験 (Fig. 11) と比較し、300°Cまでは、勾配の変化を確認するもの歪応力にブラッグ波長シフトが追従することが確認できた。

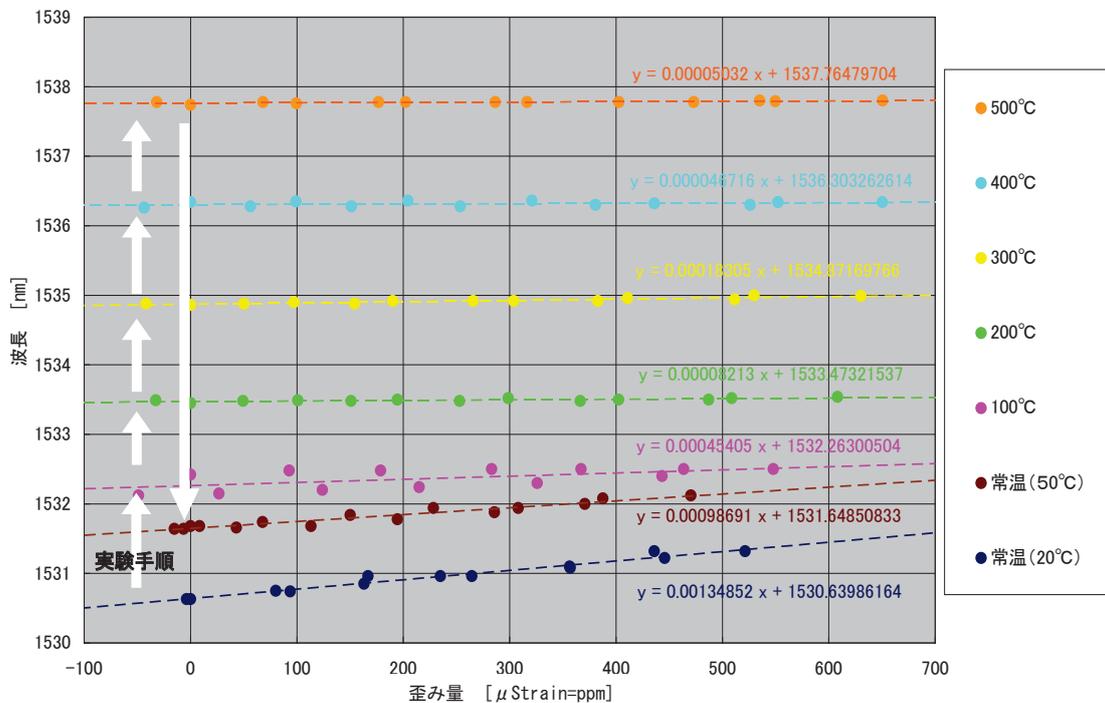


Fig. 11 昇温時歪測定実験結果

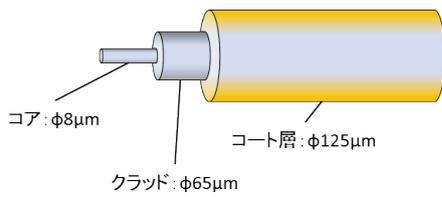


Fig. 12 光ファイバーの構造

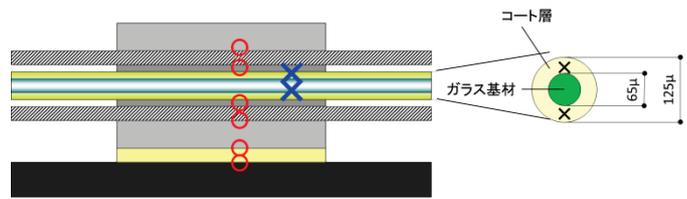


Fig. 13 滑り発生部位

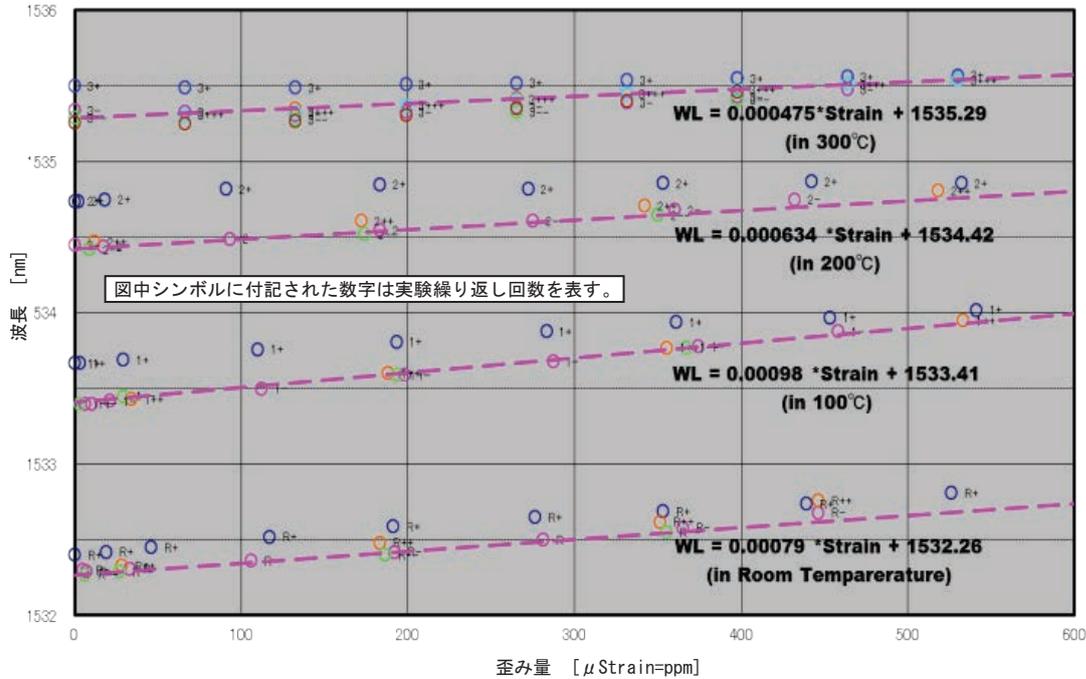


Fig. 14 コート層剥離時昇温時歪測定実験結果

6. まとめと今後の課題

高温用FBGセンサーを製作し、装着方法を検討した。
この結果、

- FBGセンサーの実装には、セラミックス系接着材を用いることができ、高温環境下（500℃）、1500μStrain程度の歪み状態で十分な接着性を有することが確認できた。
- FBGセンサーの検量線を作成した。この結果、5℃以下の測定精度で温度計測が可能であることが判明した。
- 高温環境下での歪み測定には、光ファイバーコート層の影響が大きく寄与することが判明した。

また、今後の課題としては、

- コート層を排除したFBGセンサーの制作方法の検討。
- 温度、歪に対する繰り返し試験による検量線の作成が考えられる。

これら課題を克服すれば、社会基盤の根底を支えるパワープラント等特殊施設の常時モニタリングによる健全性の確認ができるとともに、異常の早期発見に寄与し、社会システムの持続性に貢献できるものと考えている。

謝辞

本開発において、島田幸洋氏（当時 独立行政法人日本原子力研究開発機構レーザー共同研究所，現 独立大学法人 大阪大学），竹仲佑介氏（独立行政法人 日本原子力研究開発機構）両氏においては，FBGセンサーの製作や実験に多大なる尽力をいただきました。また，技術研究所建築構造研究グループ近藤祐輔氏においては実験の協力を得ました。ここに深い感謝の意を記します。

また，本開発の一部は，財団法人 若狭湾エネルギー研究センター「平成 24 年度可能性試験調査研究事業」の受託研究として実施したことをここに記します。

参考文献

- 1) Y. Shimada, A. Nishimura, M. Yoshikawa and T. Kobayashi, "Design of Monitoring System of High Temperature Piping System by Heat Resistant Fiber Bragg Grating", Journal of Laser Micro/nanoengineering Vol. 5, No. 1, pp. 99-102, 2010.
- 2) 島田幸洋, 西村昭彦, 鈴木宏和, 石橋久義, 川原啓孝, 伊藤主税, 青山卓史, "高速炉伝熱管材料を使用した耐熱 FBG センサの実装試験", 日本原子力学会 2012 年春の年会
- 3) Y. Shimada, A. Nishimura, and H. Suzuki, "Heat resistant fiber Bragg grating sensor by femtosecond laser processing -Fine processing in optical fiber and fabric reinforcement-", International Conference on Laser Applications in Nuclear Engineering 2013 (LANE13) p8-13
- 4) H. Suzuki, Y. Shimada, and A. Nishimura, "Installation of a heat resistant fiber Bragg grating sensor -Investigation of adhesive rigid strength by tensile strength machine-", International Conference on Laser Applications in Nuclear Engineering 2013 (LANE13) p8-14

An examination of installation of a heat resistant fiber Bragg grating sensor

Hirokazu SUZUKI and Akihiko NISHIMURA

Abstract

Strain and temperature monitoring by optical fiber sensors is useful for safety operation of industrial plants. A FBG (fiber Bragg grating) sensor is useful to monitor them.

Rigid installation of FBG becomes most important in long term operation. This paper describes how to install FBG on a metal surface by using an adhesive.

To date, the authors have been studying how to install the FBG sensor on a metal surface. The installation method is considered a method of mechanically installation with a metal band, by welding and by adhesion. The first method is not suitable because of the loosening of the sensor due to thermal expansion. The second method is also not suitable causing the stress strain concentration by the metal base material is melted. For these reasons, the adhesive method is considered as the best way.

Requirements for the adhesive are a sufficient adhesive strength at temperatures up to 500 deg., coefficient of thermal expansion of the adhesive is equal to the metal material and not peel off even if the stress is applied to the metal material. The authors selected the ceramic adhesive which satisfied these conditions. FBG sensor is flexible structure. Using the adhesive a mold was fabricated. Using the same adhesive the molded FBG sensor was installed on the metal material.

By these test, under the condition of the tensile stress and the thermal stress are generated at the same time in high temperatures, it becomes the FBG measurement is possible.

Key words: Optical fiber, Fiber Bragg Grating, High-temperature environment, Temperature measurement, Strain measurement, Adhesion
