

耐熱 FBG を用いた高速炉プラント健全性監視システムの開発 —耐熱 FBG のひずみ計測性能評価—

Development of a health monitoring system using a thermal-resistant fiber Bragg grating for fast reactor power plants: performance evaluation of a thermal-resistant FBG for strain measurement

日本原子力研究開発機構	猿田 晃一	Koichi SARUTA	Non-Member
日本原子力研究開発機構	月森 和之	Kazuyuki TSUKIMORI	Non-Member
日本原子力研究開発機構	島田 幸洋	Yukihiro SHIMADA	Non-Member
日本原子力研究開発機構	西村 昭彦	Akihiko NISHIMURA	Member
福井大学大学院工学研究科	小林 喬郎	Takao KOBAYASHI	Non-Member

A thermal-resistant fiber Bragg grating (FBG) fabricated by femtosecond laser processing was examined to evaluate the performance as a strain sensor, compared with a conventional FBG sensor. Each FBG was affixed on a stainless-steel beam along with a strain gauge to measure the Bragg wavelength shift as a function of strain. We used the intensity of the reflection spectra from the FBGs as a weighting factor to determine the Bragg wavelengths. Although the strain sensitivity for the thermal-resistant FBG was found to be 0.34 pm/ $\mu\epsilon$, a measurement accuracy of $\pm 3 \mu\epsilon$ was able to be achieved by employing the Bragg wavelength determination algorithm, which was comparable to a measurement accuracy of $\pm 2 \mu\epsilon$ for the conventional FBG sensor.

Keywords: fiber Bragg grating, health monitoring, structural integrity, strain, high temperature, nuclear power plant, fast reactor

1. 緒言

近年、原子力発電においては、機器の劣化状態に基づいて科学的かつ合理的に保全を行う状態基準保全の重要性が指摘されており[1]、これを実現するための基盤技術として、ひずみや温度を計測しプラントの健全性を監視するシステムの開発が重要課題になっている。すでに軽水炉プラントでは、光ファイバセンサの1つであるFBG (fiber Bragg grating)センサを利用した健全性監視システムが提案されている[2, 3]。FBGセンサは、ゲルマニウムが添加された光ファイバのコアに紫外線レーザを照射して、長手方向に周期的な屈折率分布を作り回折格子を形成したもので、光を伝播させると格子間隔とコアの実効屈折率で決まる特定の波長を持った光 (Bragg 波長) が反射される。熱や機械的な力が加わると、格子間隔と実効屈折率が変化し、それに伴って Bragg 波長も変化するため、その変化量からひずみや温度を計測することができる。

光ファイバセンサは、熱電対などの従来のセンサにはない耐電磁誘導性や耐久性などの特徴から、高い信頼性が求められる原子力分野での利用に有効である。

特にFBGセンサは、計測点の多点化や波長分割多重化が可能であることから経済性に優れており、またひずみや温度以外にも振動や圧力など、原子力プラントにおける様々な物理量の計測に応用できるため、健全性監視システムに用いるセンサとして極めて有望である。その一方で、500°C を超える高温環境となる高速炉プラントでFBGセンサを使用するには、その耐熱性が問題になる。高速実験炉「常陽」において、FBGセンサを用いた変位・振動計測が報告されているが、実際、耐熱性の問題から、FBGセンサは1次主冷却系配管のサポート部など、温度が100°C以下である部位に設置されている[4]。

現在、一般的に利用されている紫外線レーザによって書き込まれたFBGセンサは、本質的に屈折率構造の熱安定性が低く[5]、耐熱性を持つポリイミドをFBGセンサ表面にコーティングした場合でも、300°C程度の耐熱性しか得られていない。また、フェムト秒レーザによって石英ガラスに永続的な屈折率変化を誘起できることが報告されているが[6]、この現象を利用した耐熱性を有するFBGセンサについては、分光特性などの基礎的な研究が現在行われている[7-9]。

連絡先：猿田 晃一、〒919-1279 福井県敦賀市白木1丁目、独立行政法人日本原子力研究開発機構
電話：0770-39-1031、e-mail：saruta.koichi@jaea.go.jp

筆者らは、500°C を超える高温環境においても使用可能な耐熱 FBG の開発とそれを利用した高速炉プラントの健全性監視システムの開発を行っている[10]。筆者らは、これまでにフェムト秒レーザを用いて光ファイバのコアに FBG を形成し、加熱試験によって 600°C の耐熱性を有することを確認した[11]。本稿では、製作した耐熱 FBG のひずみ計測性能について報告する。

2. 実験

2.1 実験装置

耐熱 FBG を取り付ける試験片には、SUS304 の金属片を用いた。大きさは 500 mm × 25 mm × 2 mm である。図 1 に示すように耐熱 FBG は、金属片の中央部分に、金属片の長手方向の軸と平行に取り付けてある。耐熱 FBG の固定には一般の工作用接着剤を使用している。金属片に発生するひずみは、耐熱 FBG と平行に取り付けたひずみゲージによって計測する。

図 2 に実験装置を示す。金属片への負荷は、4 点曲げ法によって与える。図に示すように、金属片は、耐熱 FBG が取り付けてある面を上に向け、金属片の中心が点 A、A' 及び点 B、B' から等距離になるように設置する。金属片は点 B、B' で支えられており、両端の点 A、A' に鉛直下向きに、同じ大きさの力が加えられる。力の大きさは、ねじの移動量で調整する。4 点曲げ法では、区間 BB' が純曲げになるため、この区間では一様な曲げモーメントのみが発生する。したがって、区間 BB' には一様なひずみ分布が形成されるため、耐熱 FBG とひずみゲージには、同じ大きさのひずみがかかることになる。

光源には 1528 - 1564 nm の赤外光を出す広帯域光源を用いた。光源から出た光は耐熱 FBG に入射し、反射された光が FBG スペクトラムアナライザで計測される。

2.2 実験方法

ねじによって金属片を 0.2 mm 間隔で押し下げていき、耐熱 FBG からの反射スペクトラムを計測する。同時に、ひずみゲージで金属片に生じているひずみを計測する。計測した反射スペクトラムから Bragg 波長を求め、波長シフトとひずみの関係を得る。比較のため、同様の実験を紫外線レーザによって製作された市販の

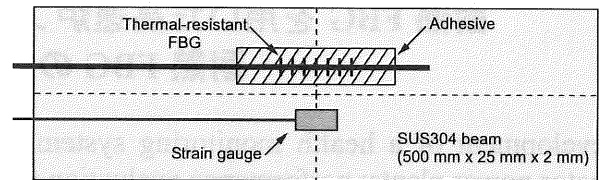


Fig. 1. Geometry of the thermal-resistant FBG and the strain gauge.

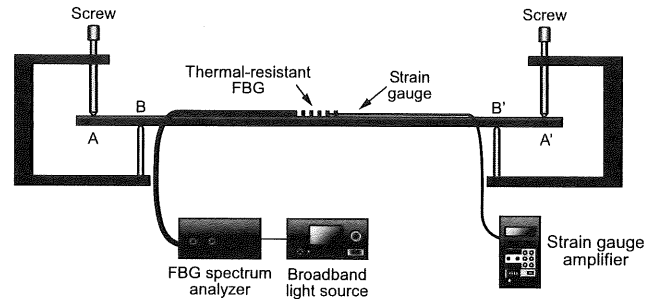


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup.

常温用 FBG についても行う。

2.3 Bragg 波長決定アルゴリズム

理論上、Bragg 波長は、FBG の反射スペクトラムにおいて最大強度によって特定することができる。しかしながら、実際には Bragg 波長の半値幅の広がりや、光検出器の標準化誤差、量子化誤差などの影響により、必ずしも最大強度だけで Bragg 波長を決めることは適当ではない。そこで本実験では、Bragg 波長のスペクトラムが対称性を持つことに着目し、スペクトラム強度を重み付けに利用して Bragg 波長を求めた。

FBG スペクトラムアナライザで計測された反射スペクトラムはデジタル化されている。離散化された波長及び強度をそれぞれ、 λ 、 $I(\lambda)$ で表す。はじめに、あらかじめ予想される Bragg 波長のシフト範囲内の反射スペクトラムを切り出し、最大強度 I_{\max} を検出する。次に閾値 γI_{\max} ($0 \leq \gamma \leq 1$) を決め、この値以上の強度を持つ波長の集合 $S = \{\lambda | I(\lambda) \geq \gamma I_{\max}\}$ を作る。この集合に対し、強度を重みとして、次式により重み付き平均を計算することにより Bragg 波長 λ_B を決定する。

$$\lambda_B = \frac{1}{I_T} \sum_{\lambda \in S} I(\lambda) \lambda \quad (1)$$

$$I_T = \sum_{\lambda \in S} I(\lambda) \quad (2)$$

本アルゴリズムでは、平均を計算することにより FBG

スペクトラムアナライザの波長分解能未満の値が補間されるため、標準化誤差の影響を低減することができる。実験では、閾値として $\gamma = 0.1$ を用いた。

3. 実験結果と考察

図3に耐熱FBG(実線)と常温用FBG(破線)の反射スペクトラムを示す。スペクトラムは、両FBGともに金属片に取り付けていない自然の状態で計測しており、それぞれ最大値が1になるように規格化してある。常温用FBGのスペクトラムを見てみると、Bragg波長である1530.4 nmの位置に急峻な単一のピークが現れている。半値幅は0.23 nmである。1558 nmを中心に緩やかに広がる領域がみられるが、これは光ファイバ端面からのFresnel反射光に起因している。一方、耐熱FBGの反射スペクトラムを見てみると、Bragg波長の設計値は1554.3 nmであるが、この波長以外にも複数のピークが現れているのがわかる。半値幅も0.8 nm程度の広がりがあり、常温用FBGのような、単一ピークの鋭い反射スペクトラムは得られていない。

図4、図5に、常温用FBG及び耐熱FBGのBragg波長 λ_B の変化を、ひずみ ϵ の関数としてそれぞれ示す。直線は、最小2乗法で求めた実験値の1次フィットである。また、 $\Delta\lambda_{\max}$ と $\Delta\lambda_{\sigma}$ は、それぞれ直線に対する実験値の最大誤差と標準偏差である。単位ひずみ量に対するBragg波長の変化量をひずみ感度と定義すると、直線の傾きから常温用FBGのひずみ感度は、約1.2 pm/ $\mu\epsilon$ である。一方、耐熱FBGのひずみ感度は約0.34 pm/ $\mu\epsilon$ であり、常温用FBGの感度に比べて約1/4の値になっており、感度が低いことがわかる。これは、Bragg波長の半値幅が広いことが主な原因と考えられる。一方、誤差を比較してみると、耐熱FBGのほうが小さくなっていることに気づく。これは、耐熱FBGの場合、図3からわかるように反射スペクトラムに複数のピークがあるため、集合 S に含まれるデータ点数が常温用FBGの場合よりも多くなり、結果として平均演算による補間効果が高まったためと解釈できる。標準偏差をひずみ感度で割り、ひずみ計測精度を推定すると、常温用FBGの場合は $\pm 2\mu\epsilon$ 、耐熱FBGでは $\pm 3\mu\epsilon$ となり、今回の実験で用いた耐熱FBGでも常温用FBGと同程度のひずみ計測精度を期待できることがわかる。ひずみ感度が小さい場合、Bragg波長のシフト量が小さくなるために標準化誤差の影響を受け易くなるが、

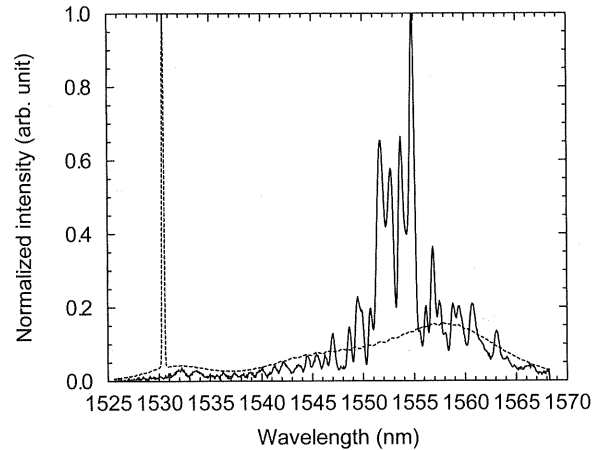


Fig. 3. Reflection spectra of the thermal-resistant FBG (solid curve) and the conventional FBG (broken curve).

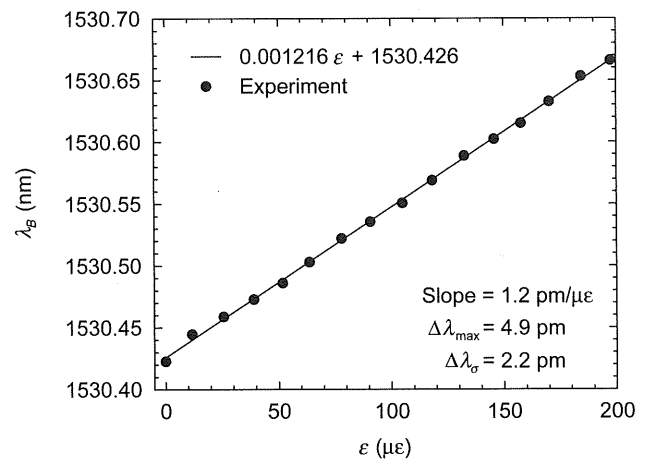


Fig. 4. Bragg wavelength of the conventional FBG as a function of strain.

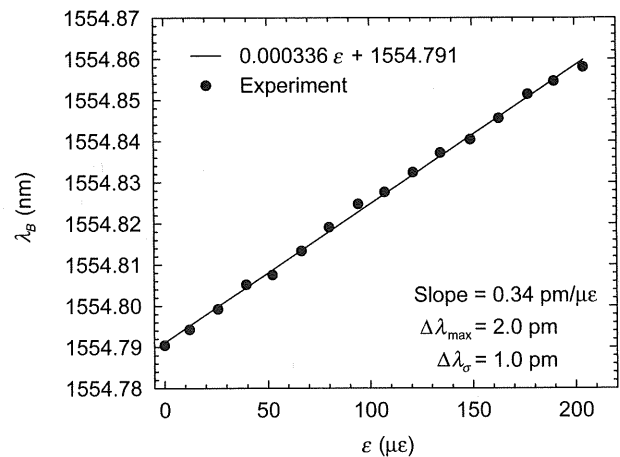


Fig. 5. Bragg wavelength of the thermal-resistant FBG as a function of strain.

本研究では、スペクトラム強度を重みとして重み付き平均を計算したことにより、効果的な補間が行われた結果、標準化誤差の影響が低下し高いひずみ計測精度が得られたと言える。図6は、図4で用いた常温用FBGの反射スペクトラムに対して、 γ の値を変えてBragg波長を計算した結果である。補間が行われない $\gamma=1$ では、FBGスペクトラムアナライザの標準化誤差のため、Bragg波長が階段状に変化しているが、 $\gamma=0.1$ ではひずみの増加に対してBragg波長は線形的に変化しており、本アルゴリズムによって効果的に補間が行われていることがわかる。

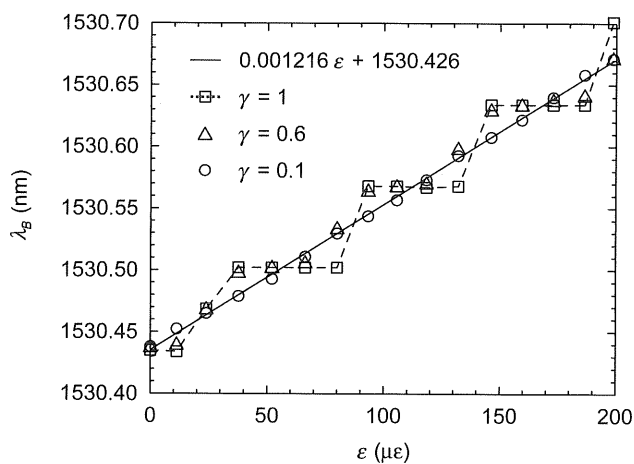


Fig. 6. Interpolation accuracy for several values of γ .

4. 結言

フェムト秒レーザで製作した耐熱FBGのひずみ計測性能を評価した。今回の実験に用いた耐熱FBGのひずみ感度は、約0.34 pm/ $\mu\epsilon$ であり、市販されている常温用FBGの感度と比べると、約1/4の値になっており低感度であった。しかしながら、反射スペクトラム強度を重みとして用いた重み付き平均によってBragg波長を求めることにより、実験値の標準偏差から推定されるひずみ計測精度は約 $\pm 3\mu\epsilon$ となり、常温用FBGの計測精度 $\pm 2\mu\epsilon$ と同程度の精度が達成可能であることが示された。

今後は、耐熱FBGのセンサ性能の向上を図ると共に、実装方法など高速炉プラントへの適用に向けた研究を実施していく。また、実時間多点計測が可能であるFBG計測方式[12]についての検討を行い、健全性監視システムとしての開発を進めていく。

参考文献

- [1] 原子力安全・保安院, “原子力発電施設に対する検査制度の改善について,” 原子力安全・保安院報告書, 2006.
- [2] R. Arai, A. Sumita, S. Makino, and T. Maekawa, “Large-scale hybrid monitoring system for temperature, strain and vibration using fiber Bragg grating sensors,” Proc. SPIE **4920**, 62-72 (2002).
- [3] R. Arai, A. Sumita, T. Maekawa, and H. Namihira, “Condition and health monitoring system for a nuclear power plant with fiber Bragg grating sensors,” Proc. 6th Int. Conf. Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety, 2004, Paper ID. N6P020.
- [4] K. Matsuba, C. Ito, H. Kawahara, and T. Aoyama, “Development of fast reactor structural integrity monitoring technology using optical fiber sensors,” J. Power Energy Syst. **2**, 545-556 (2008).
- [5] S. R. Baker, H. N. Rourke, V. Baker, and D. Goodchild, “Thermal decay of fibre Bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber,” J. Lightwave Technol. **15**, 1470-1477 (1997).
- [6] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao, “Writing waveguides in glass with a femtosecond laser,” Opt. Lett. **21**, 1729-1731 (1996).
- [7] D. Grobncic, C. W. Smelser, S. J. Mihailov, and R. B. Walker, “Long-term thermal stability tests at 1000°C of silica fibre Bragg gratings made with ultrafast laser radiation,” Meas. Sci. Technol. **17**, 1009-1013 (2006).
- [8] Y. Shen, J. He, Y. Qiu, W. Zhao, S. Chen, T. Sun, and K. T. V. Grattan, “Thermal decay characteristics of strong fiber Bragg gratings showing high-temperature sustainability,” J. Opt. Soc. Am. B **24**, 430-438 (2007).
- [9] Y. Li, C. R. Liao, D. N. Wang, T. Sun, and K. T. V. Grattan, “Study of spectral and annealing properties of fiber Bragg gratings written in H₂-free and H₂-loaded fibers by use of femtosecond laser pulses,” Opt. Express **16**, 21239-21247 (2008).
- [10] 増住, 月森, 島田, 西村, “高速炉高温構造物の健全性モニタリングのための耐熱FBGセンサの開発,” 日本保全学会第5回学術講演会要旨集, 2008, pp. 133-138.
- [11] 島田, 西村, 増住, 月森, 吉川, 小林, “耐熱FBGによる高温構造物の振動変形モニタリング技術の開発(2) 製作したFBGの波長特性測定と高温試験,” 原子力学会 2008年秋の年会予稿集, 2008, C47.
- [12] T. Kobayashi, Y. Enami, and H. Iwashima, “Highly accurate fiber strain sensor based on low reflective fiber Bragg gratings and fiber Fabry-Perot cavities,” Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2006), paper TuE12.