

# 超短パルスレーザーによる FBG センサの製作と性能評価

Fabrication and performance assessment of FBG sensor with pulse laser processing

|              |       |                    |             |
|--------------|-------|--------------------|-------------|
| 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      |
| 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 | None Member |
| 福井大学大学院工学研究科 | 小林 喬郎 | Takao KOBAYASHI    | None Member |

Fiber Bragg Grating (FBG) is the periodic refractive-index structure in an optical fiber core, where the light of a specific wavelength is reflected. It can be used as temperature or a distorted sensor by measuring change of the reflective wavelength of FBG. We processed FBG using a Chirped Pulse Amplification titanium sapphire laser. As a result, the peak intensity of reflective spectrum has been successfully improved from -40 dB to -24 dB. Heating test under operational temperature of Fast Breeder Reactors is now planned. The heat-resistant FBG sensor developed using ultra-short pulse laser processing will contribute to the surveillance of power plants for seismic safety.

**Keywords:** Fiber Bragg Grating, Pulse Laser Processing, High Temperature, Seismic Safety

## 1. 緒言

発電用原子炉施設の保守管理におけるリスク情報の活用への取組みが拡大しており、状態監視技術を積極的に活用することでプラントの安全・安定運転を確実なものにすることが求められている。一方、土木建築の分野では光ファイバーセンサにより温度・ひずみを測定し構造健全性を監視する構造ヘルスマモニタリングの手法が既に実用化されている。このような背景から原子力機構の高速実験炉「常陽」においても、余寿命診断と状態監視の観点から各種の光ファイバーセンサの導入が試みられた。余寿命診断としては歪・温度分布計測が重要であり、ラマン散乱型温度センサや FBG センサが用いられる[1]。

FBG センサとは石英光ファイバー中に周期的屈折率分布を作成し、透過または反射する光のスペクトルの波長シフトを検出して温度または長さの変化を測定するものである。透過または反射する光のスペクトル特性は  $\lambda = 2nL$  で表され、 $\lambda$  は波長、 $n$  はコアの屈折率、 $L$  はグレーティングの周期を表す。

連絡先：島田幸洋 〒619-0216 京都府木津川市  
梅美台 8-1-7 日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所 電話：0774-71-3332  
e-mail:shimada.yukihiro@jaea.go.jp

測定対象物の変位・振動による長さの変化は  $L$  に反映するため、反射光の中心波長の変化を測定することで遠隔モニタリングを行う。この方法は多点、遠隔、高速、高精度測定が可能であるが、現在実用化されている FBG センサは、水素雰囲気と紫外光の干渉露光を利用するため、200℃以上では周期的構造が消失し高温構造物への適応は困難である。「常陽」においても FBG センサは 1 次主循環ポンプの異常振動や配管支持装置の固着や緩みの監視を目的に 100 度以下の低温部分に取り付けられている。FBR における Na 冷却配管や HTTR 等の高温条件下での使用は不可能である。

一方、近年の超短パルスレーザーの発展により石英、セラミック等高脆化材料への精密加工が可能となったことから FBG の製作過程においてもこの技術が導入された。その結果、従来法にて製作したセンサと比較してより高温での使用が可能となり、長周期型の FG センサでは 500℃までの使用が可能となった[2]。しかし従来法と同等の計測精度を得るためには短周期型の FBG センサが望まれる[3]。我々はフェムト秒超短パルスレーザーを用いた point by point 法加工にて高温耐性のある短周期型 FBG センサの製作とその特性に合わせた計測システムの開発を行っている[4][5]。今回は加工方法を改善し、歪みセンサとしての性能向上を図った実験結果について報告する。更に動的な振動計測に対応する、波長可変光源の製作についても報告する。

## 2. 実験

### 2.1 加工システムの構築と高温耐性試験

本研究で加工に使用した光源はチャープパルス増幅チタンサファイアレーザーシステムである。パルス幅は約 150fsec、繰り返しは 10Hz、加工時のエネルギーは 1-10  $\mu$ J である。

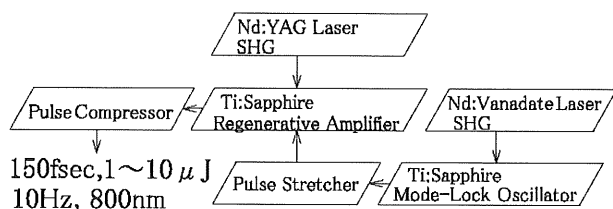


Fig. 1 加工に使用した CPA-チタンサファイアレーザーシステム

このレーザー光を位相差顕微鏡内に導光し、対物レンズを通して観察光軸と同軸で試料に照射加工を行う。位相差顕微鏡を使用することで加工による微小な屈折率差が観測可能である。CCD カメラを併用してレーザー照射加工中でも観察を行える。試料を精密ステージに保持して移動しながら光の照射を行い、10nm 以下の精度で周期的屈折率構造を作製する加工を行う。最初に試料駆動部の精度評価及びこのレーザー加工が高温耐性有る事を確認すべく石英板中に周期的屈折率構造の作成を行った。加工試料の位相差顕微鏡像を Fig. 2 に示す。加工の間隔は図中の縦方向が 5  $\mu$ m、横方向が 10  $\mu$ m である。この試料の加工形状の評価は試料に垂直面上に He-Ne レーザーを集光し、背面に現れる回折光像のコントラストを測定することで行う。回折光像を Fig. 3 に示す。試料の高温試験は真空鐘内にて加熱を行い、加熱の前後での回折光像のコントラストの変化を計測した。その結果、960 $^{\circ}$ C、1 時間の過熱の後でも回折光のコントラストは変化しないことからこの加工は高温耐性を持つことを確認した。

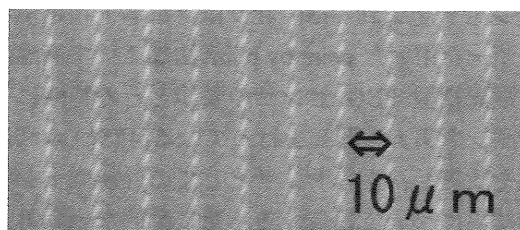


Fig. 2 石英板中に加工した周期的屈折率構造

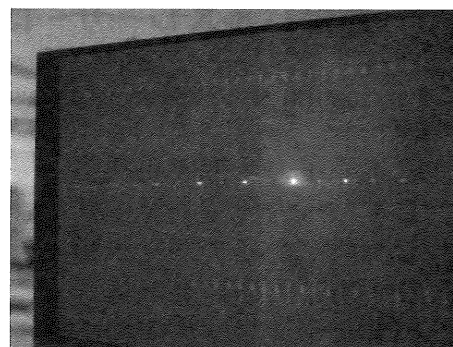


Fig. 3 周期的屈折率構造による He-Ne レーザーの回折光像

### 2.2 最適レーザー加工条件の探索

Fig. 3 の回折像の乱れはレーザー加工形状に起因する。そのため次に最適なレーザー光条件の探索を行った。レーザーのパルスエネルギーの違いによる加工形状の変化を Fig. 4 に示す。この結果から加工に使用する光のエネルギーは 1  $\mu$ J 程度が最適であることが解った。



Fig. 4 光のエネルギーによる加工点形状の変化

### 2.3 光ファイバーへの FBG 加工と高温試験

point-by-point 法にて FBG 加工をするためには直径 10  $\mu$ m 以下のコア内に加工を行う事が必須である。そのため以下の手法を用いた。

1. 光ファイバー試料を屈折率整合液にて液浸させることでレーザー入射面を平面化した。試料付近の写真を Fig. 5 に示す。
2. ファイバー内にフェムト秒レーザーを集光する際に発生する白色光を伝播させた端面にて光強度の測定を行い、強度が最大となるように焦点位置の最適化を行った。

作成した FBG の反射スペクトルの測定結果を Fig. 6 に示す。反射の中心波長は 1538nm、最大反射率は -24dB でありほぼ設計通りの中心波長特性が得られた。

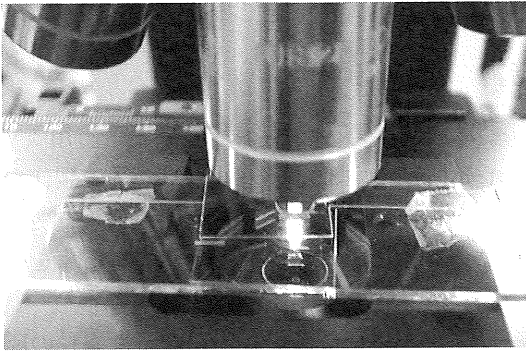


Fig. 5 加工部の試料近傍の様子  
(光ファイバーの周囲は屈折率整合液で液浸)

次にこの試料を 600°C、24 時間の加熱試験を行い、昇温前後の反射スペクトルを比較した結果、1543nm より長波長側では反射率の変化が見られた。しかし設計波長である 1538nm 付近の反射率に大きな変化は認められず、実用上支障がない程度に FBG 構造が保持されている事を確認した。

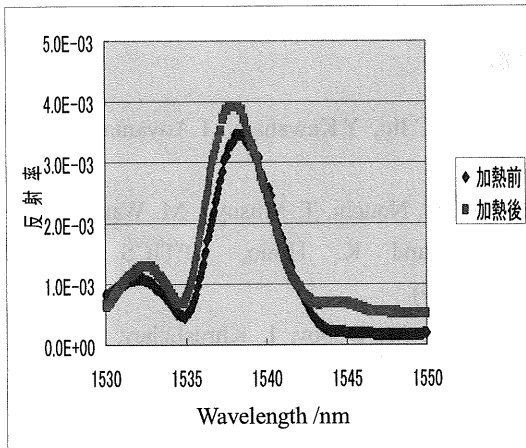


Fig. 6 製作した FBG の加熱前後の反射スペクトルの変化 (FBG 加工長 : 80 μm、半値幅 : 4nm)

## 2.4 加工システムの改良による反射特性向上

FBG を歪センサとして用いる際の性能は波長スペクトルの形状に強く依存する。既に市販されている常温用 FBG センサの波長スペクトルの線幅に近づけるべく、以下の装置を導入して加工の精度向上を図った。

### 1. 加工用長距離作動微動ステージ

FBG の反射波長線幅は屈折率構造の作用長で決定される。これまで使用していた piezoelectric 駆動のステージは精度は得られるものの、最大移

動量は 80 μm 程度であり十分ではなかった。今回はハーモニックギアドライブのステッピングモーターを導入し、piezoelectric ステージと同程度の高精度かつ長作動の加工が可能となった

### 2. アクティブ除震台

上記の長距離作動ステージでは piezoelectric ステージと比べると移動中の振動が若干大きく、nm オーダーの加工では精度低下の要因となる。この対策としてアクティブ除震台を導入した。

以上の装置の導入及び加工コントロールソフトウェアの改良等の対策の結果、FBG の反射率は向上し、線幅も狭線化した。反射波長の測定結果を Fig. 7 に示す。また、狭線化により波長の多重化が可能となった。Fig. 8 は FBG 特性波長が 20nm 間隔の 3 波長となるように加工した結果である。それぞれ異なる部位に作成している。加工部位の位置間隔は 100mm である。

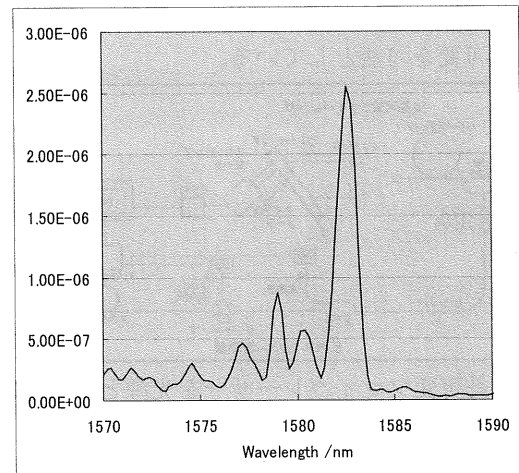


Fig. 7 FBG 加工長 1mm での FBG 反射スペクトル (半値幅 : 1.2nm、加工点数 : 600 点)

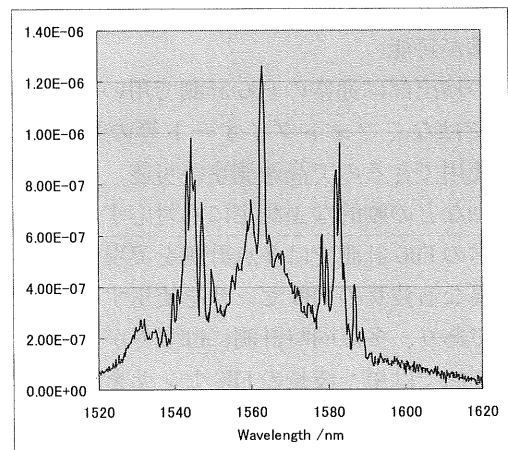


Fig. 8 FBG 反射波長の多重化の例 (1540, 1560, 1580nm)

これらの結果では反射波長構造が単一のピークでは無くサイドバンドが生じていて単純な形状をしていない。これは歪センサとして使用する際に誤差の元となる。原因は加工レーザー強度の時間揺らぎにあると考えられ今後の検討課題である。

## 2.5 高速測定に対応した波長可変光源の製作

前項までに製作した FBG センサの波長特性の測定では既製の白色光源と高分解能分光器を使用している。この光源の波長を単一化し、FBG の特性波長付近に合致させれば検出側はフォトダイオード等の強度検出器が使用できるため高速応答性が向上し、振動計測にも対応できる。そこで我々は波長可変レーザーを光源とした FBG 測定システムの開発を行っている。装置の概略図を Fig. 9 に示す。レーザーダイオードにてエルビウムドープファイバーを励起し、片側の共振器端面は可動するグレーティングを配置し、波長可変を可能としている。

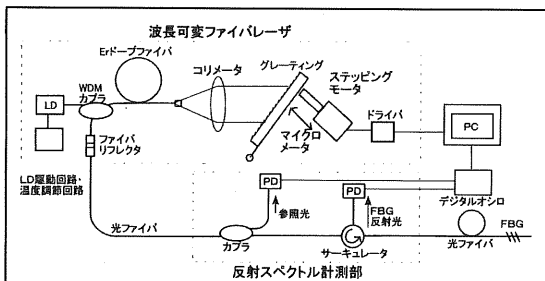


Fig. 9 波長可変ファイバレーザーを光源とする FBG 測定システムの概略図

この光源を使用した時間領域での計測では以下の利点がある[6]。

1. 市販の分光器と比べて小型、ロバスト、安価に構築が可能。
2. 光の検出部は通常の FBG 計測で用いられる分光器ではなくフォトダイオード等の強度検出器が使用できるので高速測定が可能。そのため地震動などの動的な歪測定にも対応する。
3. 通常の FBG 計測では多点計測を実現するためには異なる波長の FBG センサを使用することが必須であり、多点同時計測には限界が生じる。この方法では単一波長の FBG センサを直列に繋ぎ合わせるため計測点数の上限値が高い。

このように反射率や線幅などを最適設計した FBG と計測系を組み合わせることで、より高度なオンラ

イン計測システムが構築可能である。

## 3. 結言

1. フェムト秒パルスレーザーを用いた point-by-point 法による FBG センサ加工製作を行った。高温試験の前後で波長特性が大きく変化しないことからこの FBG 構造が耐熱性有る事を確認した。
2. レーザー加工長を最適化して FBG 特性波長の反射スペクトル構造が狭線化し、歪センサとしての性能が向上した。
3. 高温試験にて Na 炉に適用可能な 600°C での使用の可能性に目途を付けたことは、今後の Na 炉保守保全技術の新たな展開を可能とする。
4. 耐熱 FBG センサと波長可変光源を組み合わせた計測手法は近年重要性が議論されている原子力発電プラント等の耐震保全活動[7]において、高温機器を常時モニタリング、健全性を評価する強力な方法となる。

## 参考文献

- [1] K.Matsuba, C.Ito, Y.Kawahara, T.Aoyama, ICON-15 (2007).
- [2] Y. Kondo, K. Nouchi, T. Mitsuyu, M. Watanabe, P. G. Kazansky and K. Hirao, OPTICS LETTERS 24,646-(1999).
- [3] A. Martinez, M. Dubov, I. Khrushchev, I. Bennion, "Direct writing of fiber Bragg gratings by femtosecond laser," Electron. Lett. 40, 1170-1172 (2004).
- [4] 島田, 増住, 西村, 土井, 月森, "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", 原子力学会 2008 年春の年会予稿集 J25.
- [5] 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.
- [6] T.Kobayashi, Y. Enami, H. Ishikawa, "Highly Accurate Fiber Strain Sensor based on Low Refractive Fiber Grating and Fiber Fabry-Perot Cavities.", 18th Int. Optical Fiber Sensors Conf. (OSA, 2006), paperTuE12
- [7] 「中越沖地震の教訓と耐震安全研究」, 安全研究フォーラム, 原子力安全委員会, (2008)