

光ファイバブラッググレーティングセンサのプラントモニタリングへの適用性

Applicability of a sensor based on optical fiber Bragg grating to nuclear plant monitoring

東京大学大学院工学系研究科	雨宮 邦招	Kuniaki AMEMIYA	Non-Member
東京大学人工物工学研究センター	高橋 浩之	Hiroyuki TAKAHASHI	Member
高エネルギー加速器研究機構	藤田 薫	Kaoru FUJITA	Non-Member
東京大学大学院工学系研究科	中澤 正治	Masaharu NAKAZAWA	Non-Member
核燃料サイクル開発機構	有吉 昌彦	Masahiko ARIYOSHI	Non-Member
核燃料サイクル開発機構	伊藤 敬輔	Keisuke ITO	Non-Member

Abstract Fiber Bragg grating (FBG) is a kind of an optical device developed rapidly in these years and it has several excellent characteristics as a sensor for temperature and/or strain. To investigate the applicability of FBG even as a vibration sensor for nuclear plant monitoring, novel measurement systems were developed and tested. The results revealed that the FBGs had sensitivity to vibration and temperature even in radiation environments. Vibration and/or temperature of components around cooling systems at the YAYOI and JOYO reactor could be detected successfully with FBG based sensors.

Keywords: Optical Fiber Sensor, Fiber Bragg Grating, Multi-point Sensing, Plant Monitoring
E-mail: leo@q.t.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

近年ますます原子力の安全性への社会的な関心が寄せられるようになってきている。このため、原子力プラントの安全性をさらに高め、より大きな安全が得られるようにする努力が求められており、原子力プラントの健全性について、配管等の温度変化・歪み・振動状態のリアルタイム多点モニタリングシステムを開発することは意義深いと考えられる。

光ファイバは軽量性、可撓性、電磁誘導雑音の無誘導性などの優れた特性を持つ。そのような特長を活かしつつ、さらにセンサとしての機能を併せ持たせた光ファイバセンサの開発が進められている。近年急速な発展を遂げている光ファイバブラッググレーティング (FBG) もそのような光ファイバセンサの一種である¹⁾。FBG は光ファイバの長手方向に周期的な屈折率の変調 (周期 Λ) を与えることによって、Bragg反射条件 $\lambda = 2 n \Lambda$ を満たす特定の波長 λ の光を反射させる機能を持たせたものである。ここで n は実効屈折率である。 Λ は光ファイバの歪み、温度によって変化するため、それら複数の物理量の情報を λ のシ

フトとして得ることが可能である。

また、FBG は一本の光ファイバ上に複数個配置することが可能であり、測定点ごとに Λ を変化させてFBGを作成し、白色光を入射することでそれぞれのFBGでの反射波長を区別でき、多点からの情報を容易に弁別することができる。このため、多点におけるマルチパラメータの取得を単一の光ファイバで行うことができる電源不要なインラインセンサとして期待されている。

一方でプラントモニタリングにおいては、ボルトの脱落やポンプ回転体の損耗などによる固有振動数の変化を捕捉することにより事故を未然に防ぐことが可能である。しかし現在のところ温度、歪み測定に関して優れた光ファイバセンサが開発されているものの²⁾、それらと同時に使用できるような振動センサは開発されていない。FBGを測定箇所に適切に固定して用いれば、振動による歪み量の変動を反射波長の時間変化として見ることによって振動モニタとして利用できる可能性がある。そこで本研究では測定対象として振動も想定し、より高い安全性が求められる原子力施設へのFBGセンサの適用可能性について、①振動測定も含めた計測系の開発とその実証②放射線環境

下におけるセンサ系の健全性を検証した。

2. 高速中性子を含む放射線場におけるFBGの挙動

本研究で開発を目指す測定系は原子力プラントの強力な放射線環境下に敷設することを想定している。主に高速中性子を含む中性子線場および γ 線場であると考えられる。そこで東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設の高速度中性子源炉「弥生」のグレージング孔でFBGの照射実験を行なうと同時に、FBGからの反射波長および反射強度の測定を行なった。入射光源には発光ダイオード(LED、安藤電気製AQ4215(131))を使用し、2×2光カプラを通して照射中のFBGに光を入射させ、反射光は再び2×2光カプラを通して光スペクトラムアナライザ(安藤電気、AQ6317)へと導き反射スペクトルを取得した。

Fig. 1は反射波長約1330nmのFBGについて、中性子照射による反射スペクトルの変化をプロットしたものである。Aは未照射時、Bは弥生炉の出力が1kWに達した時点、Cは積算出力6kWhに測定されたものである。いずれにおいても反射スペクトル形状の変化は認められない。Cでは反射光の減弱が見られるが、ピークの検出は充分可能なレベルである。これは主に光ファイバ自身の放射線誘起損失によるものが大きいと考えられる。6kWhの時、中性子フルエンスは $3\text{-}6 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ と見積もられており、この程度までの中性子環境下ではFBGの反射波長に有意な影響はないと考えられる。

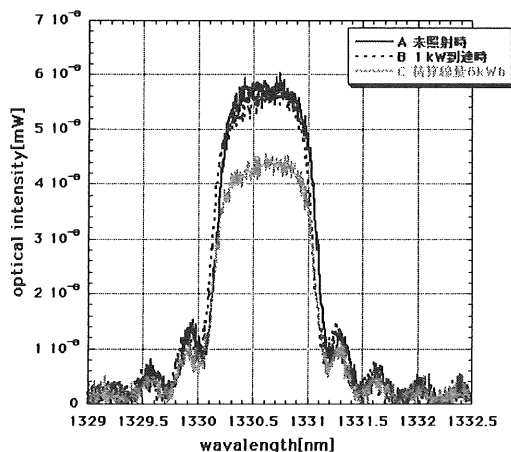


Fig. 1 Reflection spectrum under fast neutron field.

3. γ 線環境下における振動測定

^{60}Co 照射装置を使用してFBG センサによる γ 線照射下での振動センシングの可能性を調査した。FBG がマルチパラメータに感度があるため、測定対象を限定した場合にそれ以外の物理量が誤差要因となる。このような問題点を克服するべくFBG センサを温度や歪みに感度を持たないようにした振動計測システムを構築し³、 γ 線環境下において実際に振動の測定を行った。このシステムの概略図をFig. 2 に示す。ここでは直列に繋いだ同じ反射波長を持つ2つのFBGを厚さ0.2mmの鉄板の表裏に貼付けており、振動源であるスピーカーの上に置かれている。広帯域なスーパーLED光源からの光はFBG ①を通過したあとでFBG②に入射する。もし、FBG①と②の反射波長が同じ場合にはFBG ②で反射するべき光はすでにFBG ①によって反射されているため、FBG ②からは光が反射されない。逆に、FBG ①と②の反射波長が異なる場合には、それぞれから反射光が戻ってくるためフォトダイオード (THORLABS 社、D400FC) で受光する光量は大きくなる。鉄板に曲げ応力が加わった場合、凸となる面に設置されたFBGは他方より強く引き張りされ反射波長がFBG ①と②では異なることになり、PDに入射する光量が増大する。ここで2つのFBG を一体として同じ場所に置いているので、環境(温度)が変化しても各々の反射波長のシフトを相殺することができる。また、FBG の反射波長の変化を光スペクトルの取得およびその解析から得るのではなく、PDへ入射する光量の変化として測定することによって、比較的安価で数kHz以上の高速な振動を捕捉することが可能となっている。 ^{60}Co 照射施設において50Gy/hの線量率で γ 線照射をしながら振動の測定を行った。照射開始から断続的に照射を行い、約100日経過した時点(積算線量124kGy)でフォトダイオードからの出力及びスピーカーへ与える電圧の信号をオシロスコープ

(Tektronix 社、TDS3032)に入力し、FFTプログラムを使用して得られた周波数スペクトルをFig. 3に示す。この図においてスピーカーの駆動周波数を変化させても入力信号と出力信号のピーク周波数が一致しており、 γ 線環境下でも振動

周波数の測定が可能であることを示している。

さらにこの測定システムは、長期間（100日程度）の照射下でもメンテナンス無しでも安定に動作したが、これは通常運転中に立ち入りのできない場所の多い原子力プラントの監視に有効な特長である。

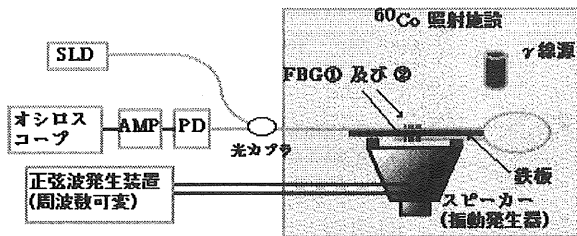


Fig. 2 Schematic illustration of vibration measurement system.

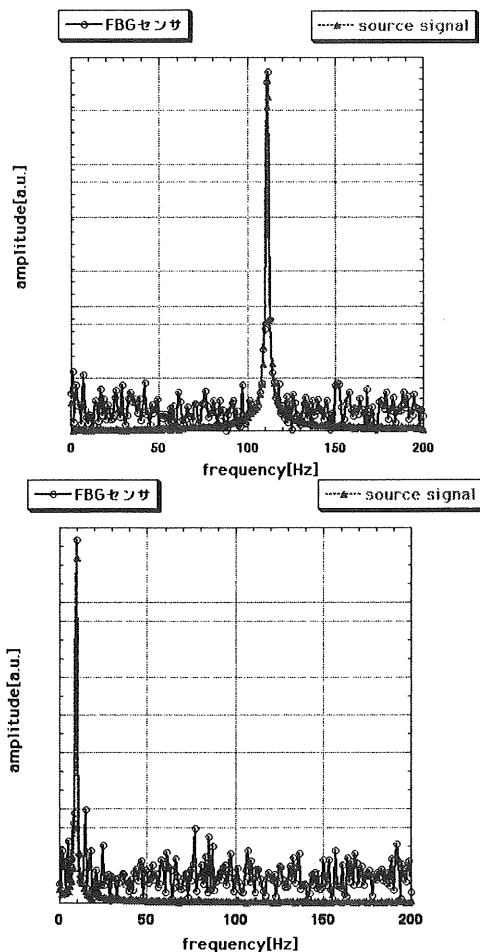


Fig. 3. Frequency spectrum at the total dose of 100 kGy.

4. 高速中性子源炉「弥生」冷却系における振動測定

4.1 振動測定原理

本節の実験では入の変化を光強度の変化へと変換する方法として、反射波長がほぼ同じである2つのFBGをセンサおよびフィルタとして使用する方法を試みた。即ち、SLD光源からの広帯域光をセンサ用FBGおよびフィルタ用FBGで2回反射させ、その光をフォトダイオードで受光する。この場合、センサ用およびフィルタ用FBGの反射スペクトルの一部が重なるようなものを選択しており、振動によってセンサ用FBGの反射波長がシフトするとその重なり部分の大きさが変化する。シフトによって完全に重なった場合には最大の光量が入射し、重なりがなくなった場合には光は入射しない。その結果、スペクトルを取得して入を測定することなく、振動による反射波長の変化を光量の大小に変換することによって、より高速に波長の変化を捉えることができる。ここで、一方のFBGの反射波長さえ固定していればフィルタとして機能するためそれぞれのFBGでの反射の順序は問わないが、今回の実験ではセンサ用FBGからの反射光をフィルタ用FBGに入射し、その反射光をフォトダイオードへと導光した。

4.2 実験体系

実機レベルの大型の構造物における適用性を検証するため、東京大学所有の高速中性子源炉「弥生」の冷却系排気ブロワ近傍にFBGを設置し振動の測定を行った。実験体系をFig. 4に示す。センサ用FBGとそれに繋がる光ファイバのみをブロワ近傍に設置し、フィルタ用FBGを含むその他の機器は全て管理区域外に設置した。ここでもセンサ用及びフィルタ用FBGは常温でほぼ同じ反射波長のものを選択した。しかしながら、ブロワ近傍は運転中に温度が上昇するため、センサ用FBGとフィルタ用FBGの反射波長が離れてしまい振動の測定が不可能になる。このためフィルタ用FBGの温度を調節するによって、常に重なり合いを持たせてある程度の反射光がフォトダイオードに入射するようにした。

測定は4.1節で示した測定体系で行い、3章と同様のフォトダイオードで電気信号に変換した

後、アンプを通して増幅しそれをFFTアナライザ（OROS社、OR24J）で処理して周波数スペクトルを算出した。FFTアナライザのサンプリング周波数は2kS/secに設定して測定を行い、FFT解析後の周波数分解能は約0.31Hzであり20回の平均化処理を行った。また、比較のために電気式センサによる測定も平行して行い、このときに使用したセンサはアンプが内蔵されたICP規格の加速度計（PCB社、352C65）であり、信号は前述と同様のFFTアナライザで処理した。

FBGは両端をエポキシ系接着剤によって固定し、さらにFBG部の上にアルミテープを貼付けて固定するという方法で直径約1mの消音器の胴体部分に設置した。また、片端が固定端となっている場所に設置すれば、光ファイバの長手方向の伸縮が生じるためにFBGの変位に対する感度が上昇するのではないかと考え、消音器を床に固定している支柱への設置を試みた。この位置の測定はFBGを埋め込んだ歪みゲージなどに使用されるポリイミド箔をシアノアクリレートの瞬間接着

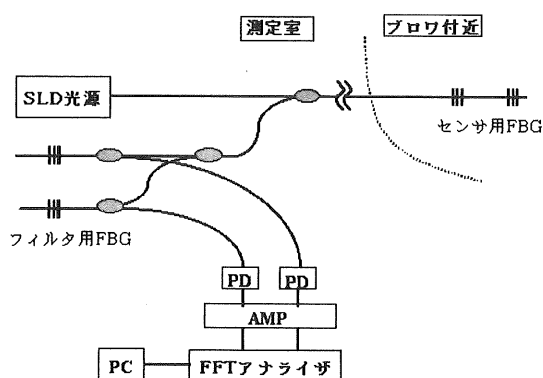


Fig. 4 Schematic illustration of vibration measurement system for YAYOI cooling system. 剤で貼付けて行った。

4.3 実験結果および考察

ブロワの起動前後の支柱に貼付けたFBGセンサの周波数パワースペクトルをFig. 5に示す。冷却系のブロワを起動することによって消音器に振動が発生するが、ブロワの起動によって起動前にはなかった周波数ピークが発生していることから、振動を捕捉できていると考えられる。さらに、それらの周波数ピークと機器の振動周波数の比較を行うためにFBGを設置した位置に加速

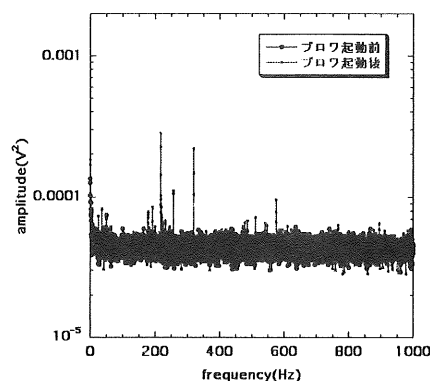


Fig. 5 Vibration spectrum before/after blower of YAYOI started.

度計を設置し、周波数パワースペクトルを取得しFBGセンサによるものと比較した。消音器支柱、及び胴体における結果をそれぞれFig. 6、7に示す。ピークとなっている周波数はほぼ一致しており、さらに強度も傾向としてはほぼ同じである。ただし、FBGセンサによって取得された信号は加速度計で取得したものに比べてかなり小さく、電源ノイズ（50Hz及びその倍波）やベースラインのノイズが大きくなっている点に注意が必要である。これはフォトダイオードに入射する光量が微弱であったため信号の強度が十分に得られず、相対的にノイズが大きくなってしまったことが原因と考えられ、より強い光源の使用、光カプラに換えた光サーキュレータの使用、接続損失の低減などによって改善可能であると考えられる。また、消音器の胴体に敷設したFBGセンサによって加速度計で測定した時とほぼ同じ周波数ピークが観測できたことから、大型の構造物に設置する場合においても片方を固定してFBGが伸縮する方向に振動を変換することなく測定可能であることが分かった。消音器胴体と支柱で得られたパワースペクトルにおいて、加速度計のピーク強度は高々1/3程度の変化しかないにもかかわらず、FBGセンサのピーク強度は1/10以下になっている。これは測定時に支柱に設置したFBGから反射してフォトダイオードに入射する光強度が1/2程度しか得られなかったことが要因と考えられるが、支柱とFBGの間にある瞬間接着剤やポリイミドフィルムなどによって振動が吸収されたことも原因の一つであると考えられる。

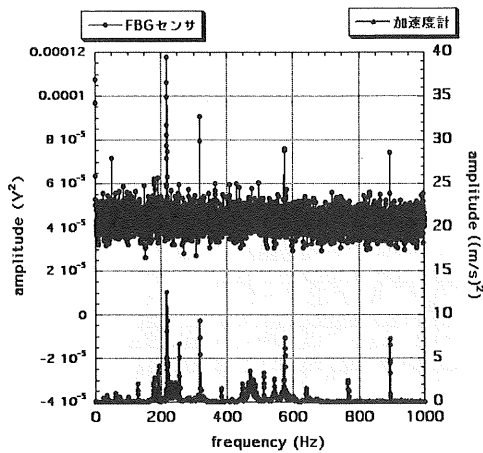


Fig. 6 Vibration spectrum around muffler suspension.

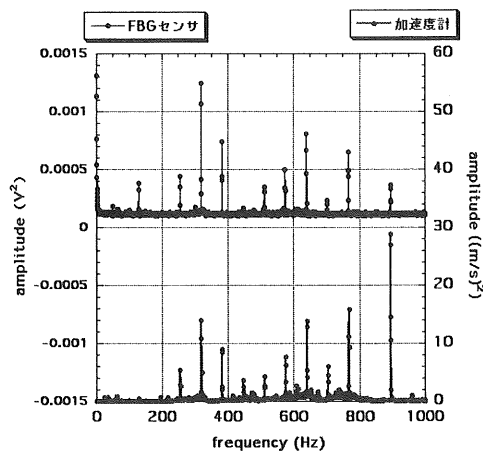


Fig. 7 Vibration spectrum around muffler main body.

しかしながら、実際に原子炉で使用されている機器の振動状態がFBG センサによって取得できること、さらに今回は2点であるものの直列に繋がれたFBG による同時計測が可能であることが実証できたことは重要である。

5. 「常陽」1次冷却系への設置

5.1 概要

「弥生」冷却系において振動測定が可能であることを実証できたことを踏まえて、核燃料サイクル

ル開発機構の高速実験炉「常陽」の1次系配管へ設置し検証を行なっている。より原子力発電プラントに近い規模の大きさであり、配管近傍は約100Gy/h程度のγ線場という厳しい環境での使用が実証できれば、商業炉へのモニタリングへの適用が可能と考えられる。

5.2 設置概要

「常陽」1次主冷却系への敷設系統図をFig. 8に示す。配管外装板の上もしくは配管の重みを支えるハンガーサポートなど6箇所計15個のFBGを設置した。計15個のFBGセンサは光ファイバA～Cにそれぞれ4つずつ、光ファイバDに3つ接続されている。FBG部分と伝送用ファイバ部分とは放電融着により接続されている。光ファイバAのそれぞれのFBG部両端はエポキシ系接着剤で測定対象物に固定した。光ファイバBは配管に接触させながらも応力負荷によるひずみや振動を拾わぬように設置した。光ファイバCは参照用として測定対象物に接触させぬよう、近傍に設置した。光ファイバDは光ファイバAと異なる方法(ポリイミドフィルムによる貼付)で配管に固定した。

原子炉起動前はほぼ雰囲気室温程度で保たれていたため温度センシングに関する実験は行なわず、1次系ポンプ運転の有無に関連して配管の振動測定が可能かどうか、FBGセンサ系を用いて測定することとした。本章における振動の測定はセンサとなるFBGによって反射された光を約1nm幅の透過ピークを持つフィルタを通すことによって、波長のシフトを強度変化に変換したものを測定した。

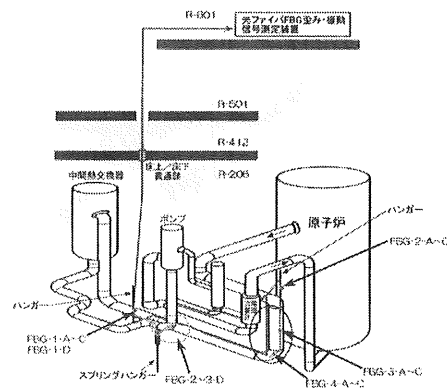


Fig. 8 Schematic illustration of FBG sensor layout on JOYO site.

原子炉起動後はサイクルごとにセンサ部の温度が変動するため、放射線環境下におけるFBGセンサの温度に対する感度を見ることとした。

5.3 原子炉起動前の測定結果

Fig. 9に1次系ポンプ流量変化時における光ファイバラインFBG No.1について取得した振動スペクトルを例として示す。電源ノイズ(50Hzの倍数)が多少見られるものの、流量の変化によってスペクトルにも変化が生じていることが確認された。

さらにFBGセンサからの振動スペクトルを、加速度計を用いて測定した結果と比較した結果をFig. 10に示す。強度の大きなピークの周波数は加速度計とFBGセンサで一致しており、FBGセンサによってポンプ出力の上昇に伴う冷却系の振動状態を捕捉できることが実証された。

Fig. 9
Vibration spectrum for FBG A-1.

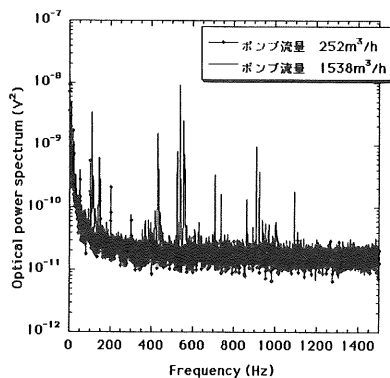
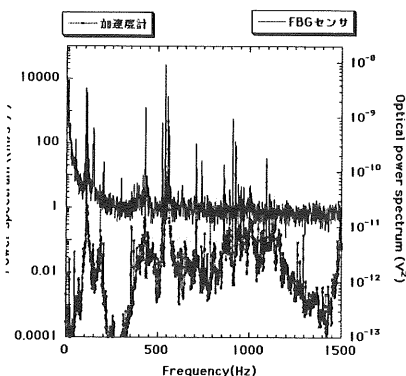


Fig. 10
Vibration spectrum for FBG A-1 and comparison with acceleration sensor.



5.4 原子炉起動後の測定

平成15年から始まった「常陽」MK-III性能試験中にFBG A-1センサの温度感度を測定した (Fig. 11)。原子炉は主に8~11月にわたって起動され、

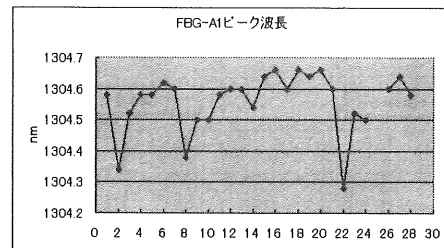
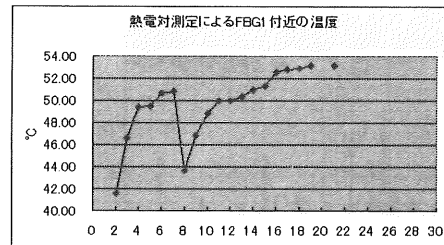


Fig. 11
Correlation between wavelength and temperature around FBG A-1 after JOYO started.



FBG設置箇所の積算線量はγ線が $4.0 \times 10^{20} \text{C/kg}$ 、中性子が $5.9 \times 10^{11} \text{n/cm}^2$ であった。高放射線下においても反射波長が雰囲気温度に追従しており、放射線環境下での配管温度測定が実証された。

6. 結論

FBG センサに基づいたプラントセンシングシステムを構築して、中性子 ^{60}Co γ線照射下、「弥生」の冷却系ブロワ近傍および「常陽」1次系配管に設置し、その動作を確認した。測定システムはそれぞれで異なるものの、放射線環境下においてもFBGは振動測定に使用可能であることが確認され、さらに原子炉で使用されている機器の温度や振動を一本の光ファイバ上で多点にわたって測定可能であることが実証された。この結果、原子力プラントにおいてFBGによる振動/温度監視への適用可能性が示されたと言える。

謝辞

本研究の一部は核燃料サイクル公募型研究の援助により行なわれたものである。

参考文献

- [1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, Applied Physics Letters, **32** (1978)p647
- [2] A. Kimura et al., Measurement Science and Technology, **12** (2001)p966
- [3] Ka On Lee, Kin Seng Chiang and Zhihao Chen, Optical Engineering, **40**(2001) p2582