

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560736

研究課題名（和文） デュアルピークFBGセンシングシステムの開発

研究課題名（英文） Development of a dual-peak FBG sensing system

研究代表者

津田 浩（TSUDA HIROSHI）

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員研究グループ長

研究者番号：30262108

研究成果の概要（和文）：

光ファイバセンサの一種であるFBGをセンサとする簡便な超音波検出システムの開発を目指し、FBGセンサをファイバ・リング・レーザの共振器ミラーとするシステムを構築した。ファイバ・リング・レーザに組み入れた光アンプが持つ光利得の波長依存性を利用してFBGセンサが受ける超音波を光強度に変換して検出することが出来た。従来システムと比較して寸法、重量、コストを約1/10に抑えたシンプルなシステムを開発した。

研究成果の概要（英文）：

The objective of this study is to develop a compact FBG ultrasonic sensing system. A fiber ring laser with an FBG sensor acting as a resonant mirror was constructed. This system was capable of detecting ultrasound by using the wavelength dependence of the optical gain in the optical amplifier incorporated in the sensing system. Compared with systems proposed previously, the developed system can be constructed at around 10% in size, weight and cost.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450000	1,950,000
2010年度	1,100,000	330000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300000	1,300,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：光ファイバセンサ、安全・安心材料、非破壊検査、超音波、計測工学、振動検出

## 1. 研究開始当初の背景

FBGは較正不要、多重化可能、多機能などの利点を有する光ファイバセンサであることから、スマート構造体のセンサへの適用が期待されている。しかしこの波長変調型センサを超音波検出に用いるには、超音波がもたらすサブピコメートルレベルの微小な反射波長変化を検出するシステムが必要で、従来技術では複雑で高価な計測系になることからFBGによる超音波検出技術が普及していな

いのが現状である。研究代表者はFBGに局所的なひずみを残留させて被検体に取り付けたところ、被検体を伝搬する超音波振動に同期したFBG反射光強度を得た。この事実はFBG単体に超音波センサとフィルタの二つの機能を内蔵させたことを意味しており、従来技術では必要であった反射波長変化を検出するための特別な装置を用いずに超音波を検出でき、非常にシンプルで安価なFBG超音波計測システムが実現できる可能性がある。

本提案のデュアルピーク FBG はシンプルで安価な超音波検出システムを実現し、スマート構造体への FBG 光ファイバセンサの適用を拡大させる新しい技術となる可能性を有している。

## 2. 研究の目的

電磁波障害を受けない、軽量・小型、耐久性に優れるなどの多くの特長を有する光ファイバセンサを用いたシンプルな超音波検出システムを開発することを本研究の目的とする。

具体的には波長変調型の光ファイバセンサである FBG を用いて超音波・AE などの非破壊検査に利用される高周波振動を検出するシステムを開発を目指す。従来、FBG をセンサとする超音波検出システムにはレーザ復調システムが利用されてきたが、高価、大型であることやひずみ・温度変動条件下では連続的な振動検出ができないなどの問題があった。本研究ではこれらの問題を解消した安価、コンパクト、かつ温度・ひずみ変動条件下で連続的に超音波が検出可能なシステムを開発する。

## 3. 研究の方法

本研究は以下に列挙する方法で行った。

- (1) FBG 中のひずみ分布がデュアルピーク FBG センサの反射スペクトル形状に及ぼす影響の評価
- (2) 新しい超音波復調方式の開発
- (3) ファイバ・リング・レーザを用いたセンサシステムのひずみ変動条件下における超音波検出実験とシステムの最適化
- (4) システムの実用化への展開

## 4. 研究成果

研究の方法に記した項目毎の成果を以下に記す。

- (1) 数値解析により FBG のグレーティング内部に局所ひずみを与えたときの反射スペクトル形状を計算し、超音波検出に最適なひずみ分布の探索を試みた。ひずみを受けた FBG に対応する反射スペクトルはひずみを受けない FBG の反射スペクトルと比較して、反射率が低くなることが分かった。その結果、大きな内部ひずみ分布を与えるデュアルピーク FBG では良好な感度の超音波検出が出来ないことが分かった。
- (2) デュアルピーク FBG センサに代わるコンパクト、かつシンプルな超音波検出システムを探索した。広帯域光源を利用した FBG 超音波検出システムは従来、信号復調に光フィルタを用いてきた。しかし光フィルタを用いることなく、広帯域光照射された FBG からの反射光

強度信号を周波数フィルタや平均化処理などの信号処理により超音波信号復調できることを実証した。つまり復調用光フィルタを用いないシンプルな構成の FBG 超音波検出システムを開発し、特願 2010- 11526 として知財登録した。光フィルタを用いることなく超音波復調する上記のシステムは広帯域光源の持つ光出力のわずかな波長依存性を利用していると考えられる。しかしながら広帯域光源から放射される僅かの光出力のみを利用する方式では超音波検出感度の向上は見込めないことから、ファイバ・リング・レーザを用いたシステムを利用することを考案した。つまりファイバ・リング・レーザに組み込まれる光アンプの光利得の波長依存性を利用することで、超音波振動がもたらすわずかなブラッグ波長変化をファイバ・リング・レーザで作られるレーザ強度として検出することができると考えた。

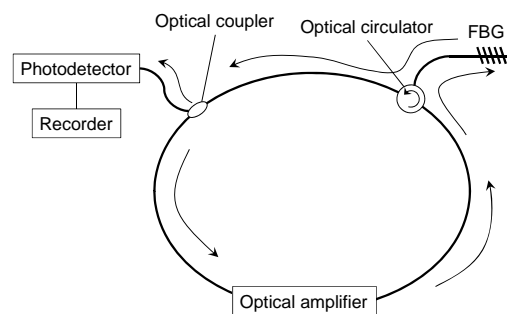


図 1 開発された計測システム

図 1 に示す FBG をファイバ・リング・レーザの共振器ミラーに用いたシステムを用いて数 Hz の振動から 20kHz を超える超音波までの広帯域な振動検出が可能であることを実証した。この開発されたシステムを特願 2010- 61986 として特許出願した。

- (3) FBG はひずみ・温度変化を受けた場合、反射スペクトルが大きく波長シフトする。このため従来の超音波検出システムでは反射スペクトルの波長変動に応じて、復調システムを制御する必要があった。このためひずみ変動下において発生する AE の連続計測は困難とされてきた。しかし本研究で開発したファイバ・リング・レーザシステムでは自発的に FBG が受けるひずみ・温度変化に応じたブラッグ波長においてレーザ発振する。このため温度・ひずみ変化に係わらず復調システムの制御は不要になると考えられる。そこで FBG に異なるひずみを与えた際

の超音波応答を検出し、図 2 に示すように FBG が受けるひずみに依存せずに超音波検出が可能であることを実証した。このときの反射スペクトルシフトの様子を図 3 に示す。このように反射スペクトルが大きくシフトした条件下においても同等感度で超音波を検出できることを実証した。  
またシステムの最適化についてはファイバ・リング・レーザの光カップラの分配比、光アンプの駆動電流が同システムの超音波検出感度に影響を与える

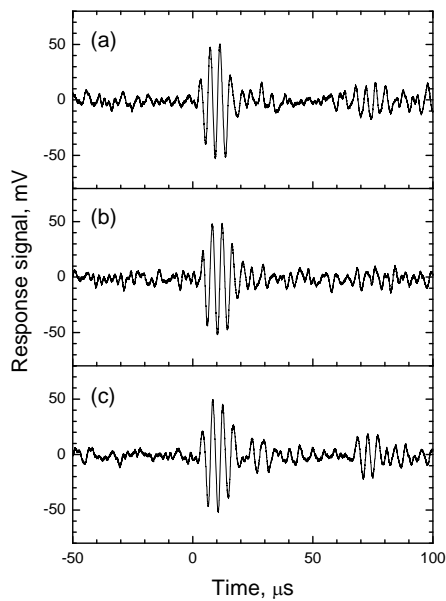


図 2 ひずみ変動下での超音波検出、  
(a)圧縮 0.06%、(b)ひずみなし、(c)  
引張り 0.06%

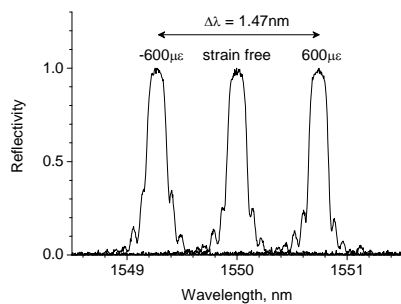


図 3 図 2 の超音波検出時の反射スペクトルシフト

と考えられることから、これらのパラメータを操作し、検出感度を最大にする設定を探索した。光カップラの分配比を 1 : 9 程度にすることで超音波の検

出感度を向上させることができた。また光アンプの駆動電流に関しては検出素子の検出能が飽和しない範囲で最大にすることで検出感度が最大になった。  
(4) ファイバ・レーザシステムを超音波検出のみでなく、様々な分野に適用できるかどうかについて模索することを目的に、片持ち梁に落球衝撃を与えた際の衝撃、ならびに自由振動の検出に開発したシステムを利用した。  
図 4 に衝撃時の FBG センサと従来、衝撃検知に多用されてきた圧電センサの応答波形の比較を示す。両センサとも同時間において衝撃を検知していることが分かる。またこの落球衝撃がもたらした自由振動に対する FBG センサと振動計測に多用されているひずみゲージの応答を示す。両センサとも同じ周波数の振動を検出していることが分かる。このように開発されたシステムを

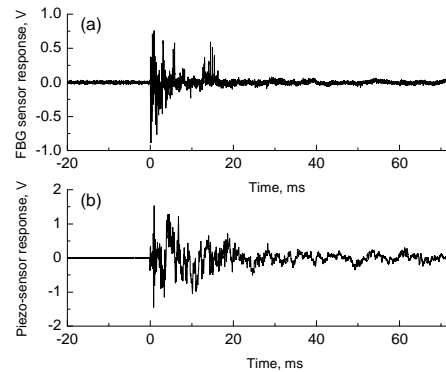


図 4 落球衝撃時のセンサ応答  
(a)FBG センサ、(b)圧電センサ

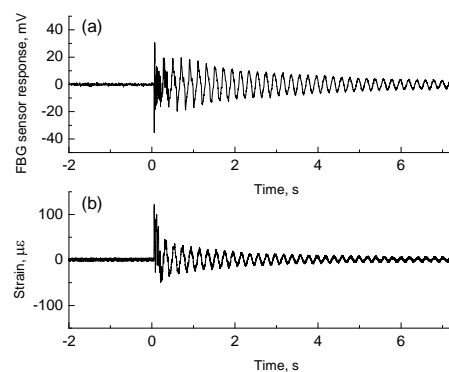


図 5 落球衝撃後の自由振動計測  
(a)FBG センサ、(b)ひずみゲージ

用いて超音波検出のみでなく、衝撃や機械的振動を測定することができることを実証した。

さらに民間の非破壊検査企業と共同で液体水素雰囲気において稼働する機構品の振動計測を本研究で開発した FBG センサシステムを用いて行った。この試験では最大回転速度 30,000rpm のモータ軸受け部の振動計測を目的に、FBG センサを軸受け部近傍に接着して回転数を変化させたときに FBG が計測する振動を計測した。その結果、FBG センサが計測した動的ひずみの最大成分強度が現れる周波数がモータ回転数と良く一致することが明らかになった。回転機械では軸受け部のミスアライメントでは回転数よりも低周波数に大きなノイズが、ベアリング破損時には高周波ノイズが現れることが知られている。このことから FBG センサを用いてモータなどの回転機械の振動モニタリングが可能であると考えられる。

本研究で開発されたファイバ・リング・レーザをベースとするシステムは超音波検出のみでなく、数 Hz 程度の機械的振動から MHz までの超音波振動の広帯域な振動検出可能なセンシングシステムである。このシステムは光アンプ、光サーキュレータ、光カップラ、光電変換器、および信号収録系から構成される非常にコンパクトである特長を有する。また FBG が受けるひずみ・温度変化に関係なく振動検出可能なことは、これまで提案されてきた FBG の振動検出システムにはないユニークな特長である。

これらの研究成果は二件の特許、3 報の学術論文にまとめた。現在、この研究成果を宇宙構造物の非破壊検査に適用する共同研究が進行中であり、また特願 2010- 61986 については知財実施の見込みである。今後、開発したシステムの実用化に向けて更に研究開発を続ける予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 津田浩、A Bragg wavelength-insensitive fiber Bragg grating ultrasound sensing system that uses a broadband light and no optical filter、Sensors、査読有り、Vol. 11、2011、pp. 6954-6966、doi:10.3390/s110706954
- ② 津田浩、熊倉賢司、荻原慎二、Ultrasonic Sensitivity of Strain-Insensitive Fiber Bragg Grating Sensor and Evaluation of Ultrasound-Induced Strain、Sensors、査読有り、Vol. 10、2010、pp. 11248-11258、

doi:10.3390/s101211248

- ③ 津田浩、Fiber Bragg grating vibration-sensing system, insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser、Optics Letters、査読有り、Vol. 35、2010、pp. 2349-2351、http://dx.doi.org/10.1364/OL.35.002349

[学会発表] (計 3 件)

- ① 津田浩、Characterization of ultrasound detection with a strain-insensitive FBG sensing system incorporating fiber ring laser、IWSHM2011、2011 年 9 月 13 日、Stanford 大学、Palo Alto、CA、米国
- ② 津田浩、strain-insensitive fiber Bragg grating ultrasonic sensing system using fiber ring laser、ICCM18、2011 年 8 月 23 日、国際コンベンションセンター、西帰浦市、済州島、韓国
- ③ 津田浩、ファイバ・リング・レーザを利用した FBG 振動検出システム、第 26 回宇宙構造・材料シンポジウム、2010 年 12 月 10 日、宇宙科学研究所、模原市

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：振動検出システム、該システムを用いた装置及び振動検出方法

発明者：津田 浩

権利者：産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特願2010- 11526

出願年月日：2010 年 1 月 22 日

国内外の別：国内

名称：FBG 振動検出システム、該システムを用いた装置及び振動検出方法

発明者：津田 浩

権利者：産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特願 2010- 61986

出願年月日：2010 年 3 月 18 日

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

津田 浩 (TSUDA HIROSHI)

産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・研究グループ長

研究者番号：30262108