

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 4 月 26 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420745

研究課題名(和文)ファイバ・リング・レーザを用いたFBG振動検出システムの開発

研究課題名(英文) Development of vibration detection system using a fiber-ring laser incorporated with an FBG

研究代表者

津田 浩 (TSUDA, HIROSHI)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・総括研究主幹

研究者番号：30262108

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：FBG(ファイバ・ブラッグ・グレーティング)をセンサとするファイバ・リング・レーザシステムの振動検出能に及ぼす因子を明らかにし、同システムの構造物健全性評価への適用性について検討した。FBGのグレーティング長に関係なく、ファイバ・リング・レーザは単一モードでの安定したレーザ発振していたが、FBGとリングレーザとの距離を長くすると振動検出能が低下した。また風力タービンブレードの衝撃負荷検知に同システムを適用したところ、従来のマイクロフォンよりも高感度に検出できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The present study investigated what influenced on the vibration detect-ability of a fiber-ring laser system incorporated with an FBG as the sensor. Furthermore, the applicability of the measurement system to structural health monitoring was investigated. The study revealed as follows. The system emitted a single-mode laser stably regardless of the grating length of the FBG sensor. The vibration detect-ability of the system declined with the optical fiber length between the FBG and the ring laser. The system was applied to impact load detection of a wind turbine blade and the FBG sensor could detect impact load more sensibly than conventional electric microphones.

研究分野：非破壊検査

キーワード：光ファイバセンサ 振動計測 構造物健全性評価

## 1. 研究開始当初の背景

広帯域光を光源とする FBG(Fiber Bragg Grating)を用いた超音波計測は従来、光フィルタを復調器としたシステムを用いてきた。研究代表者は復調用光フィルタを用いることなく、広帯域光を入射した FBG 反射光強度信号を平均化処理することで FBG が受ける超音波を検出できることを見いだした。FBG が超音波振動を受けたとき、FBG の反射波長はサブ pm で変動する。この超音波振動が引き起こす波長サブ pm の範囲における広帯域光出力の波長依存性を利用して、超音波を反射光強度として検出していると考えられる。しかしながら同システムによる超音波検出には平均化が必要なため AE といった単発的に生じる超音波を検出することができず、実用的な超音波検出システムにならない。超音波検出能を高めるには FBG からの反射光強度を高めることが有効であると考えられる。

そこで光源としてファイバ・リング・レーザの利用を考えるに至った。FBG を共振器ミラーに用いるファイバ・リング・レーザは FBG のブラッグ波長においてレーザ発振する。一般的に光アンプの光利得には波長依存性がある。このためこのファイバ・リング・レーザが作り出すレーザ強度は FBG のブラッグ波長に応じて変化する。つまりこのシステムでは FBG が受ける超音波振動によるわずかなブラッグ波長変化を大きなレーザ強度変化として検出することができる。

## 2. 研究の目的

本研究ではファイバ・リング・レーザを光源とした振動検出システムの特性評価と、それを用いた新しい構造物健全性評価を目指して、下記の3つの研究課題を3年間で進める。

### (1) ファイバ・リング・レーザの発振波長の安定性と超音波計測能の評価

ファイバ・リング・レーザの共振器ミラーに FBG を用いた場合、その FBG のブラッグ波長でレーザ発振する。しかし FBG が超音波によるひずみ変調を受けることで、ブラッグ波長における単一モードレーザ発振が出来なくなることが考えられる。例えば受信する超音波波長と比べて FBG のグレーティング長が長い場合は反射スペクトルが変形し、多モード発振する可能性がある。また短いグレーティング長の FBG においては超音波受信の有無に関係なく、反射スペクトルの形状に起因した多モード発振の可能性がある。またこのシステムの FBG センサ応答特性は共振器長さや偏光状態に大きく依存することが考えられる。そこでリング共振器長さや偏光状態が FBG センサ出力に及ぼす影響を明らかにする。

### (2) ファイバ・リング・レーザを利用した多重化された FBG による超音波検出

これまでに開発された FBG による超音波検出技術においてはセンサとなる FBG 毎に復調システムを要していたことから、多点超音波

計測は非常に高価なシステムになっていた。本研究ではブラッグ波長の異なる多重化された FBG を共振器ミラーとするファイバ・リング・レーザを用いてレーザの同時多波長発振を試みる。波長多重化技術を適用して、個々の FBG センサの超音波検出可能性を検証する。

### (3) ファイバ・リング・レーザシステムの構造物健全性評価への応用

ファイバ・リング・レーザシステムは制御部がないことからコンパクトな振動検出システムを構築することができ、様々な構造物の健全性評価に適用されることが考えられる。本研究では可聴域の振動検出センサとして、FBG マイクロフォンを試作し、その音響検出特性を評価する。また風力発電用タービンブレードの衝撃損傷検出を試みる。さらに近年、安価で小型な振動センサとして注目されている MEMS 型加速度センサとファイバ・リング・レーザシステムによる振動検出比較を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) ファイバ・リング・レーザの発振波長の安定性と超音波計測能の評価

ファイバ・リング・レーザは FBG の反射スペクトルの最も高い反射率を有するブラッグ波長を中心とする狭帯域光を光アンプで繰り返し増幅することでレーザを得る。グレーティング長の長い FBG は急峻な反射スペクトルを有することから安定したレーザ発振を実現しやすいが、受信する超音波波長が短くなるとグレーティング中に引張りと圧縮ひずみが混在し、反射スペクトルがスプリットする。このとき現れた複数のピーク波長のいずれにおいてもレーザ発振可能な多モード発振を引き起こす。一方、グレーティング長の短い FBG の反射スペクトルは反射帯域が広く、高い反射率を有する波長域内で多モード発振する可能性がある。このように FBG が受ける超音波波長とグレーティング長の大小関係はファイバ・リング・レーザを用いた超音波検出に大きな影響を与える。そこで異なるグレーティング長の FBG を用いて超音波受信時におけるファイバ・リング・レーザの出力光を 1GHz 程度の FSR を有する走査型ファブリ・ペロー干渉計に入力し、レーザ発振波長の安定性を評価する。

またファイバ・リング・レーザの共振器長さや偏光状態を制御して、これらの因子が超音波計測に及ぼす影響を評価する。

### (2) ファイバ・リング・レーザを利用した多重化された FBG による超音波検出

FBG は波長変調型光ファイバセンサであることから波長多重技術を利用することによりシンプルなセンサ網の構築が可能である。これまで広帯域光を利用して多重化された FBG センサに関する研究が行われてきた。ブラッグ波長の異なる複数の FBG をファイバ・リング・レーザの共振器ミラーに用いて多重

レーザ発振できることが報告されているが、報告では二つ以上の光アンプを組み合わせた多段アンプを用いて高い光増幅率を確保している。光アンプの光増幅率の波長依存性を利用する超音波検出において、波長依存性の異なるアンプを多段接続させたシステムで超音波検出が可能か不明である。そこでプリアンプとブースターアンプを直列接続させたファイバ・リング・レーザを組み立て、FBGによる超音波検出の可能性を検証する。

また単一光アンプから構成されるファイバ・リング・レーザに反射率の異なる FBG の配列を変化させて多重化 FBG の超音波検出性を検証する。

### (3) ファイバ・リング・レーザシステムの構造物健全性評価への応用

ファイバ・リング・レーザシステムの普及を目的に、同システムを利用した新しい構造物健全性評価技術に関する研究を行う。

はじめに FBG による音響検出を試みるため、FBG マイクロフォンを試作し、同マイクロフォンの音響検出能を評価した。

また近年、風力発電が注目されているが風力発電タービンブレードに鳥などの障害物が激突して、ブレードの破損を引き起こす問題が報じられている。メガワット級の大型風力発電タービンブレードは導電材料である CFRP から作られている。従来、構造物の健全性評価に多用されている電気式センサの搭載はスパーク引火を引き起こすことから難しい。そこで誘電体である光ファイバセンサの適用が期待されている。本研究ではファイバ・リング・レーザシステムの風力発電タービンブレードの衝撃検知能を評価する。従来の電気式センサとの感度比較のため、マイクロフォンと FBG センサを用いた衝撃負荷の検出比較を行った。

また近年、老朽化したインフラの健全性を評価する技術が求められている。インフラ健全性評価においては光ファイバセンサの他、MEMS 式加速度センサの適用が注目されている。本研究では光ファイバセンサの他、MEMS 式 3 軸加速度センサを用いた構造物の健全性評価への適用として、橋梁の振動計測への適用を行った。具体的には北九州市の若戸大橋のスパン部中央に 3 軸加速度センサを取り付けて、サンプリング速度 100Hz で加速度データを一時間収録し、監視カメラによる交通量と比較した。

## 4. 研究成果

### (1) ファイバ・リング・レーザの発振波長の安定性と超音波計測能の評価

レーザ波長の安定性の評価にはファイバ・リング・レーザ出力を FSR = 1GHz のスーパーキャビティと呼ばれる走査型ファブリ・ペロー干渉計に入射し、多モード発振の有無を調査した。その結果、多モード発振が生じ易いと考えられた反射帯域の広いグレーティング長 1mm の FBG を用いても振動を与

えない場合は安定して単一モード発振していることが確認された。また超音波応答時には発振周波数が超音波振動により変化していたが、単一モード発振していることが確認された。以上からファイバ・リング・レーザを利用したシステムでは超音波検出に適した安定した単一モード発振が生じていることが確認された。

共振器長さが応答信号に及ぼす影響を評価するため、FBG とファイバ・リング・レーザとの間の長さを伸ばす、ファイバ・リング・レーザの環状長を伸ばす、の二種類の共振器長さを変えたときの超音波応答検出を行った。その結果、の FBG とファイバ・リング・レーザとの間の長さを伸ばすときに応答感度が大きく低下することが認められた。の環状長を変えても大きな超音波検出感度低下は生じなかった。このことから FBG とファイバ・リング・レーザを繋ぐ、FBG - 光カップラ間距離は短くすることが超音波検出においては重要であることが分かった。これは FBG - 光カップラ間は FBG で変調を受けた光が往復伝搬することから、共振器長さに与える影響が大きくなることが要因と考えられる。

偏光状態がファイバ・リング・レーザの発振に及ぼす影響を評価するため、ファイバ・リング・レーザシステムのすべてを偏波保持光ファイバで構成した。偏波無依存光ファイバを用いた場合と比較して発振強度が低く、また超音波に対しても明確な応答が得られなかった。偏波無依存光ファイバに偏波コントローラを挿入して、偏波状態を制御すると発振強度、超音波に対する応答強度が高くなることがあった。ファイバ・リング・レーザシステムにおいては偏波状態を固定することで振動検出感度が低下することがわかった。

### (2) ファイバ・リング・レーザを利用した多重化された FBG による超音波検出

単一アンプを用いて異なる反射率の二つの FBG を用いて多重発振を試みたが、安定した同時レーザ発振が得られなかった。次に多段アンプを用いて安定したレーザ発振が生じるか検証したが、単一アンプのときよりもレーザ発振が不安定であった。これは個々のアンプの利得の波長依存性が異なるため、わずかなブラッグ波長の振動が不安定なレーザ発振に至った原因と考えられる。

本研究では異なるブラッグ波長を有する複数の FBG を反射ミラーとしたファイバ・リング・レーザシステムで同時多重発振を安定して実現することはできなかった。現状、安定した多重発振には波長分離技術を利用して、ブラッグ波長毎に光アンプを設けるしかないと考えられる。

### (3) ファイバ・リング・レーザシステムの構造物健全性評価への応用

FBG マイクロフォンを試作し、その音響検出能を評価した。円筒形状のアクリルの一端

を葉包紙で覆い、葉包紙に FBG を接着させたマイクロフォンを試作し、音響を検出するシステムを構築した。音圧、周波数を変化させたときの FBG マイクロフォンの応答強度の変化や共振特性の評価を行った。その結果、FBG マイクロフォンは周波数に依存せず音圧のデシベル変化に比例する応答出力を示し、またマイクロフォン構造から予想される共振特性を示し、従来多用されている電気式マイクロフォンと同等の性能を有することを実証した。

風力発電タービンブレードの衝撃負荷を検出する実験では長さ 3メートルの小型タービンブレード内部に FBG マイクロフォン、電気式マイクロフォン、ひずみゲージ、および FBG をブレード側面に貼り付けて、落球衝撃を与えた際の応答信号を検出した。衝撃検出感度はひずみゲージ、電気式マイクロフォン、FBG マイクロフォン、接着された FBG センサの順に高かった。ひずみゲージによる衝撃負荷はブレードに大きな振動が生じるような大きな衝撃負荷を与えたときのみ応答が現れた。一方、電気式マイクロフォンは後段でアンプによる信号増幅とフィルタ処理による外乱ノイズ除去なしでは衝撃負荷の検出は難しかった。一方、FBG マイクロフォンはフィルタ処理なしでも衝撃負荷を検出することができた。最も高感度であった貼り付けた FBG センサは他のセンサでは全く検出できないような微弱な衝撃負荷も検出することができた。ファイバ・リング・レーザシステムを用いると可聴域から超音波域に渡る広帯域な振動検出が可能で、高感度な衝撃負荷検出が実現できた。

振動検出システムと並列して構造物健全性評価システムに用いられると考えられる MEMS 3 軸加速度センサによる振動検出能の評価試験を行った。基礎的試験として片持ち梁に FBG センサと加速度センサを取り付けて、両者の出力を比較した。加速度センサは FBG センサと一致する軸方向振動を出力するほか、梁のねじりや曲げなど光ファイバセンサが提供できない情報を出力した。応用試験は北九州市の若戸大橋のスパン中央に 3 軸加速度センサを取り付けて、サンプリング速度 100Hz で 1 時間データ収集を行い、橋を管理する北九州市道路公社から提供された交通量データとの比較を行った。FBG センサ振動システムのデータ収集を行ったが、バッテリーの故障で FBG センサデータの収録が出来ず、残念ながら加速度センサのみの評価に留まった。

橋梁中央部に取り付けた 3 軸加速度センサ出力から橋梁中央における長軸方向傾き、ねじり角、および上下振動の加速度を評価することができる。評価された傾き、ねじり角、上下振動の加速度を監視カメラで観察された交通量の結果と比較した。たとえば長軸方向の傾きは大型トラックがスパン中央部を通過するときに符号が反転する、ねじり角は

通過する車両の上下方向が異なるときに符号が反転する、上下振動の加速度を二階積分して得られる上下振動変形量は大型トラックが通過したときに大きなピークを示すといった橋梁を通過するトラックから予想される挙動と良い一致を示した。

また過去に計測された若戸大橋の振動周波数と今回の加速度センサから計測された振動周波数はいずれも 15%以内に収まる非常に近い値を示した。

このように MEMS 式加速度センサと FBG センサの振動測定と比較を行い、両者が良い一致を示すことを実証し、加速度センサを用いた構造物健全性評価の有効性を実証した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

津田 浩、中島 富男、佐藤 英一、佐藤 明良、河合 伸明、多点 FBG センサによるひずみと AE 同時計測システムの開発、IHI 技法、査読有、54 巻、2013、pp. 63-67.

〔学会発表〕(計 6 件)

津田 浩、Easy structural health monitoring technique through visualization, 8<sup>th</sup> AIST-TISTR-NSTDA Annual Conference, 2013 年 8 月 6 日、バンコク(タイ)

津田 浩、炭素繊維強化複合材料の非破壊検査技術、第 13 回炭素繊維複合材料利用研究会、2013 年 8 月 26 日、広島ガーデンパレス(広島県・広島市)

志波 光晴、津田 浩、佐藤 英一、Nondestructive reliability evaluation for Rockets、韓国非破壊検査協会秋季大会、2013 年 10 月 24 日、ソウル(韓国)

津田 浩、遠山 暢之、李志遠、中島 富男、佐藤 明良、佐藤 英一、Structural health monitoring techniques for composites, Duracosys 2014, 2014 年 9 月 14 日、東京理科大学神楽坂キャンパス、(東京都・新宿区)

野元 隆彬、荻原 慎二、津田 浩、FBG マイクロフォンの開発と風力発電ブレードの衝撃検出への適用、安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム、2015 年 3 月 17 日、沖縄青年会館(沖縄県・那覇市)

津田 浩、遠山 暢之、李志遠、王慶華、構造物画像診断技術、安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム、2015 年 3 月 17 日、沖縄青年会館(沖縄県・那覇市)

## 6. 研究組織

研究代表者

津田 浩(TSUDA, Hiroshi)

産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・総括研究主幹

研究者番号：30262108