

令和 2 年 10 月 8 日現在

機関番号：53701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06167

研究課題名(和文)常時励振したFBG振動子により過酷な環境下で動作可能な全光型多点振動測定システム

研究課題名(英文)All light type multi-point vibration measurement system using an always vibrating FBG built-in sensor can be operated under the severe environment

研究代表者

熊崎 裕教 (Kumazaki, Hironori)

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：70270262

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：CF₄プラズマを用いた異方性RIEにより微細加工したFBGを振動センサとして評価したが、機械的な脆弱性のため単独で振動測定に用いることはできなかった。そこで、板バネ上に固定したFBGに対し振動測定用に実験、評価を行った。具体的には、グレーティング長5mm、反射中心波長1550nmのFBGを板バネ(SUS-304、長さ20mm、幅2mm、厚さ0.2mm)に接着した。50Hz、200 μmまでの機械的な振幅の増加に伴い、B-10(片持ち梁、長さ10mm)の振幅に相当する電圧は単調に増加し、直線性誤差は約5%であった。応答性に課題が残ったものの約20 μmの精度で振幅測定に用いることができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

振動を光学的に遠隔測定できるシステムを提案し、FBGを加工したセンサについて検討を行った。FBGの断面に非対称性をもたせることでコアに歪みを生じるため、反射波長が変化することになる。これまで取り組んできた光ファイバの微細加工および測定技術、FBGを組み合わせれば、数十km程度の遠隔地でも周囲環境の影響を受けることなく、低周波微振動の安定的な検出が可能な光学センサに応用可能となる。光ファイバ内蔵の振動子により、小型で、耐環境性および遠隔監視性に優れた振動センサが実現できるだけでなく、光学的なシステムにより地震の予知や検知等ができれば現場で電気を必要とせず、防災リスクの低減を図ることができる。

研究成果の概要(英文)：Fiber Bragg gratings (FBGs) micromachined by anisotropic reactive ion etching (RIE) using CF₄ plasma was previously evaluated as a vibration sensor probe. However, it was not realistic to use it solely for vibration measurement because the etched FBG sensor was fragile mechanically. Then, the FBG attached to on a board spring was experimented and evaluated for vibration measurement. Specifically, a 5-mm-long FBG with a reflection center wavelength of 1550 nm was adhered on a 20-mm-long and 2-mm-width board spring with thickness of 0.2 mm made of SUS-304. The voltage equivalent to amplitude monotonically increased with the mechanical vibration amplitude (~200 μm, 50 Hz) for sensor FBG B-10 (cantilever type, 10 mm length). Although a problem remained in the responsiveness, it can be used for vibration measurement with amplitude accuracy of about 20 μm.

研究分野：光ファイバセンサ

キーワード：FBG グレーティングファイバ 振動測定 微細加工

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震等の低周波振動をファイバセンサで検出できれば小型・軽量であり、耐環境性、耐久性において優位といえる。一般的には、FBG を用いて振動を検出する方法は主にレーザ復調方式と光フィルタ復調方式の 2 種類がある。前者は FBG の反射光スペクトルの勾配が急峻な波長域のレーザ光を入射することで、わずかな反射光スペクトルの変化を FBG の反射光強度の変化として検出する。高感度であるが温度変動によりレーザ波長が動作域から外れる課題がある。後者は FBG の反射光を、透過率が波長に依存する光フィルタに入射し反射波長の変化を光フィルタの透過光強度として検出する方式である。広帯域の光フィルタを用いれば温度変動の影響を排除できるが検出感度が前者に比べ大きく劣る¹⁾。

2. 研究の目的

前述の課題を解決すべく非対称断面をもつ FBG をセンサとして振動の測定を行った。グレーティング部を含む領域のクラッドに対し側面一方向から異方性エッチングを行い非対称断面に加工した FBG および板バネに接着した FBG の二種類を振動センサとして用いた。復調用にはセンサ用とほぼ同等の反射光特性をもつ FBG を用いており、両反射光スペクトルの非重複部分に相当する光強度が測定される。2 種類の振動センサの測定範囲や精度、直線性、応答性について比較、検討を行ったので報告する。

また、予め光熱振動させた FBG 内蔵の片持ち梁に、機械的な振動を与え、その合成振動を検出できるか検討を行った。また、光熱振動の共振特性の改善についても報告する

3. 研究の方法

実験装置の構成を Fig.1 に、エッチング型センサ FBG (以降エッチング型とする) の構造を Fig.2 に示す。ASE 光源からの広帯域光を、光サーキュレータを介してセンサ FBG に入射した。小型振動発生機 (ミットヨ製: MES151, 5mm_{p-p}, 9.8N, 12000Hz) の振動部上に設置した片持ち梁状のセンサ FBG に振動を与えながら、センサ FBG からの反射光のうち、復調 FBG を透過する光の強度を、光減衰器を介してフォトデテクタで測定した。グレーティング部 5mm を含む領域のクラッドを側面一方向からのエッチングにより、10-20 μm 程度のクラッド厚さに加工した片持ち梁をエッチング型とした。長さ 10mm (センサ E-10) と 7.5mm (センサ E-7.5) の 2 種類について実験を行った。具体的には、エッチング面が真上に来るように金属板 (一辺 15mm、厚さ 1mm) に接着し、その金属板を振動発生機の振動部に固定した。センサ FBG に一定周波数の振動を与え、振幅を変化させたときの電圧振幅 (光強度に相当する電圧の振幅) を測定し直線性および測定精度について評価した。また、一定振幅および周波数の振動を短時間与えたときの電圧信号波形を測定し、応答性について評価した。三種類の周波数 (20Hz、50Hz、100Hz) について実験を行った。また、励振信号をホワイトノイズとした場合についても同様の実験を行い比較した。尚、振動部の振幅はレーザ変位計により測定した。

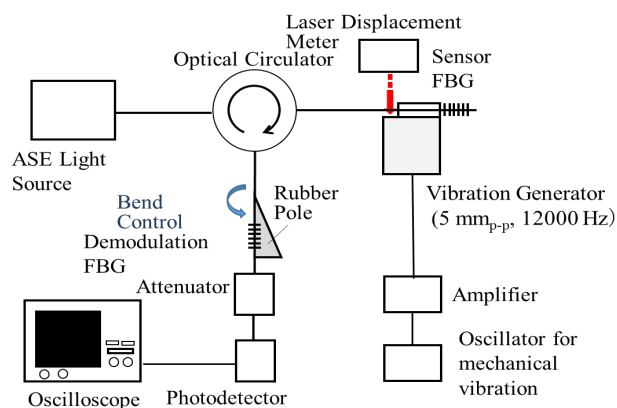


Fig.1. The experimental setup for vibration measurement system using FBGs.

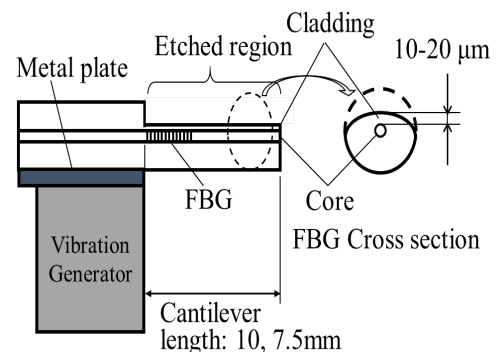


Fig.2. Structure of an etched type sensor FBG.

次に板バネ型センサ FBG (以降板バネ型とする) の構造を Fig.3 に示す。グレーティング部がステンレス製の板バネ (SUS304、長さ 20mm、幅 2mm、厚さ 0.2mm) の根元部分に来るように接着した片持ち梁を板バネ型とした。長さ 10mm (センサ B-10) と 7.5mm (センサ B-7.5) の 2 種類について実験を行った。これらを金属板 (一辺 15mm、厚さ 1mm) に接着し、その金属板を

振動発生機の振動部に固定した。センサ FBG に一定周波数の振動を与え、振幅を変化させたときの電圧振幅の変化を測定し直線性および測定精度について評価した。また、一定振幅および周波数の振動を短時間、与えた時の信号波形を測定し、応答性について評価した。三種類の周波数 (20Hz、50Hz、100Hz) について実験を行った。また、励振信号をホワイトノイズとした場合でも同様の実験を行い比較した。尚、実験装置の構成はエッチング型と同様である。

一方、合成振動波形測定用の実験装置の構成を Fig.4 に示す。長さ 10mm、反射中心波長 1549.3nm の FBG を異方性エッチングによりクラッド厚さ 20 μ m に加工した。加工面を黒塗り処理した後、FBG の根元をガラスマイクロキャピラリーで固定し、片持ち梁状のセンサ FBG とした。広帯域光源の光を、光サーキュレータを介してスピーカ上に設置したセンサ FBG に入力した。センサ FBG からの反射光を、フィルタ FBG を介してフォトディテクタに入力した。電圧値に変換された振動波形を、オシロスコープを用いて観測した。その後、強度変調した半導体レーザ光の変調周波数を変化させながら、センサ FBG の共振特性を測定した。その後、予め、共振周波数でセンサ FBG を光熱振動させた状態で、スピーカによって 50-120Hz の機械的振動を与え、合成振動波形を観測した。

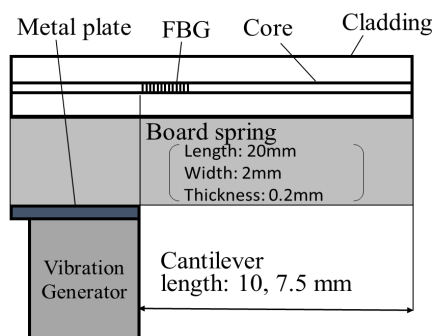


Fig.3. Structure of a board spring type sensor FBG.

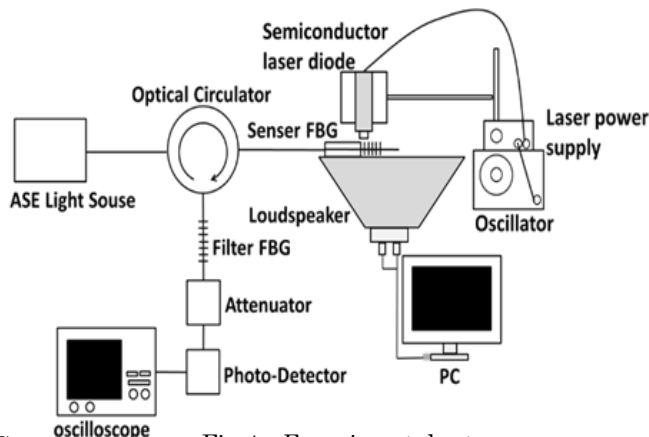


Fig.4 Experimental setup

4. 研究成果

まず、エッチング型の周波数特性を測定したところ、センサ E-10 では 170Hz で、センサ E-7.5 では 169Hz で電圧振幅が最大となる共振のような現象が生じた。共振に相当する周波数が振動子の長さに依存しなかったのは、センサ FBG を金属板に接着し、その金属板を振動発生機の振動部に固定したためと考えられる。センサ E-10 とセンサ E-7.5 に共振に相当する一定周波数の振動を与え、振幅を 4-20 μ m の範囲で変化させたときの振幅に対する電圧振幅の特性を Fig.5 に示す。振幅の範囲を 20 μ m までとしたのはそれ以上の振幅の振動を与えた場合、センサが破損する恐れがあったためである。いずれの場合も電圧振幅は振幅に対してほぼ直線的に増加し、センサ E-10 およびセンサ E-7.5 の直線性誤差は各々、約 4% および約 7% であった。また、センサ E-10 では 16 μ m の振幅の変化に対して電圧振幅は約 12mV 変化した。電圧振幅は 1.3mV 程度の精度で測定できるため、1.7 μ m 程度の精度で振幅を測定できる可能性があることが確認できた。センサ E-10 とセンサ E-7.5 では測定精度に顕著な差は見られなかった。

次にエッチング型に一定振幅および周波数の振動を短時間、与えたときの電圧振幅の波形を測定した。振幅 20 μ m、50Hz の振動を短時間与えたとき、振動印加時から電圧振幅の増加が 0.1 秒程度続き、振動停止時から信号振幅がなくなるまでも 0.1 秒程度を要した。また、出力電圧波形が入力信号波形と異なる形状となっており、応答性および測定の正確性に関しては課題が残る結果となった。これらは片持ち梁形状のセンサであることとその固定方法が起因していると考えられ、センサの長さを短くすることにより改善できる可能性もあるが、直線性や測定精度にも影響を及ぼすと考えられる。センサ E-7.5 でもほぼ同様の特性であったが、電圧振幅はセンサ E-10 の 3 倍程度であった。次にセンサ B-10、センサ B-7.5 に一定の周波数 (50Hz) の振動を与え、振幅を 40-200 μ m の範囲で変化させたときの電圧振幅の変化を Fig.6 に示す。エッチング型に比べ、振幅が 10 倍程度の振動を印加しても問題はなく、エッチング型の課題であった脆弱性は改善されたといえる。センサ B-10 では振幅の増加に対して電圧振幅もほぼ直線的に増加し直線性誤差は約 5% であった。160 μ m の振幅の変化に対して電圧振幅は約 32mV 変化した、電圧振幅は 4mV 程度の精度で測定できるため、20 μ m 程度の精度で振幅を測定できる可能性があることが確認できた。20Hz では 100 μ m 程度の振幅まで電圧振幅に変化が確認できなかった。単位時間あたりの振動部変位が小さくセンサ FBG に曲げが生じなかったためと考えられる。

センサ B-7.5 では振幅 40-100 μ m および 100-180 μ m の範囲で振幅に対して電圧振幅もほぼ直

線的に増加した。振幅が $180\mu\text{m}$ 以上の範囲では飽和状態に近くなり、直線性誤差は約 32%であった。この要因として、センサ FBG と復調 FBG の反射光スペクトルの波長整合性が悪かったこと、また、センサ用 FBG の曲げによって反射光スペクトルの形状が変形した可能性が挙げられる。 $50\text{-}180\mu\text{m}$ の範囲では振幅に対する電圧信号の変化は最も大きかったため、直線性を改善できれば、測定精度を向上できる可能性がある。次に、板バネ型に一定振幅および周波数の振動を短時間与えたときの電圧振幅の波形を測定した。振幅 $200\mu\text{m}$ 、 50Hz の振動を短時間与えたとき、また、多くの周波数成分を含むホワイトノイズによる振動を短時間与えたときについて実験を行った。エッチング型と同様、応答性および測定の正確性に関しては課題が残る結果となり、片持ち梁形状のセンサであることとその固定方法が起因していると考えられる。センサ B-7.5 でもほぼ同様の特性であったが電圧振幅はセンサ B-10 の 5 倍程度であった。

以上の結果について考察する。エッチング型を用いれば $2\mu\text{m}$ 程度の測定精度で振動を測定でき、板バネ型より 1 桁程度、優れているといえる。但し、機械的な脆弱性によりその測定範囲は振幅が $20\mu\text{m}$ 程度までに限定された。一方、板バネ型において測定精度は $20\mu\text{m}$ 程度であったもののエッチング型にあった脆弱性の問題を解決できたといえる。直線性、応答性においては両者に大きな差は見られなかったが、その理由はいずれも共通で片持ち梁というセンサ構造に起因するものである。周波数特性について考察を行う。前述の通り、センサ B-10 に 20Hz の振動を与えた場合、 $100\mu\text{m}$ 程度の振幅までは電圧振幅に変化が確認できず、感度が得られにくい周波数帯域があった。この周波数特性は主に、センサ FBG を装着した金属板およびその固定方法に依存していると考えられる。しかし、周波数を固定 (20Hz , 50Hz , 100Hz) した場合だけでなく、 20kHz 程度までの周波数成分を含むホワイトノイズにおいても振動の測定ができています。また、前述の通り両 FBG の反射光スペクトルの波長整合性を改善すれば、応答性や測定の正確性について許容範囲内であれば、振動測定に適用できるものと考えられる。エッチング型の測定精度は $2\mu\text{m}$ 程度であったが脆弱性に問題があり、測定範囲は振幅が $20\mu\text{m}$ 程度までに限定された。板バネ型 (B-10) の測定精度は $20\mu\text{m}$ 程度であったが、エッチング型 FBG の課題であった脆弱性は改善された。エッチング型、板バネ型とも応答性および測定の正確性に関しては課題が残る結果となったが、片持ち梁形状のセンサであることが起因していると考えられる。

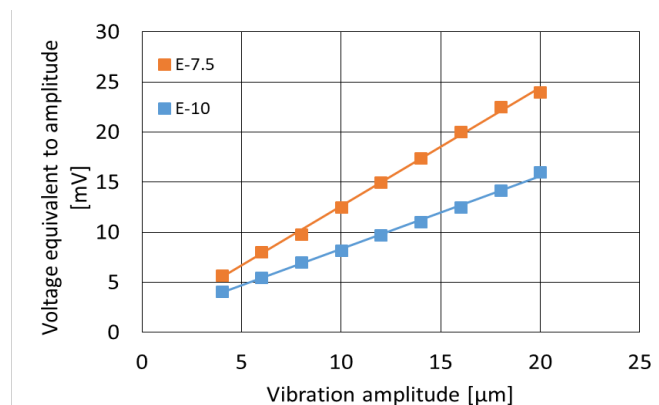


Fig.5 Voltage equivalent to amplitude as a function of vibration amplitude for an etched type sensor FBG.

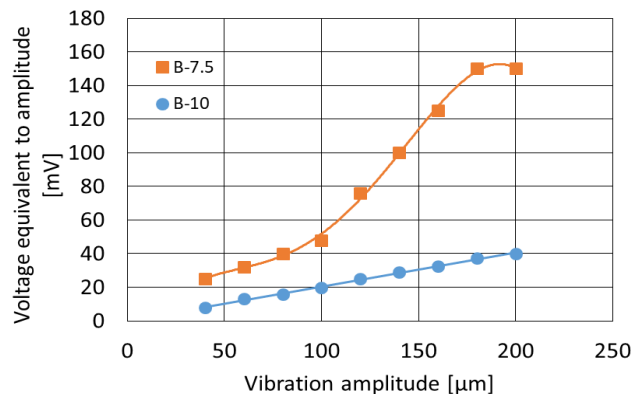


Fig.6 Voltage equivalent to amplitude as a function of vibration amplitude for a board spring type sensor FBG (50Hz).

光熱振動による共振特性を Fig.7 に示す。共振周波数は 442Hz 、半値幅は約 4Hz である。片持ち梁形状のセンサ FBG の根元部分にガラスマイクロキャピラリーを使用することにより、半

値幅は従来の約 1/4 倍になった。この結果は、根元形状を改善することによって、振動する際の機械的な抵抗が小さくなったためと考えられる。次に、予め共振周波数(442Hz)で光熱振動するセンサ FBG に、スピーカによる機械的振動(50Hz)を与えて得られた合成振動波形を Fig.8 に示す。(a)が光熱振動の励振信号、(b)が合成振動波形である。合成振動波形は励振信号と同期するとともに、50Hz で周期的に振動していることが確認できた。この結果より幅広い周波数帯域の振動検出に対応可能なシステムとして適用できると考えられる。

以上をまとめると、外部振動と光熱振動による合成振動を測定することが示された。これにより一つのセンサを用いて幅広い周波数帯の振動を検出できるということが言える。今後は、合成振動波形から光熱振動による成分を除去し外部振動のみを取り出す方法を検討していく必要がある。

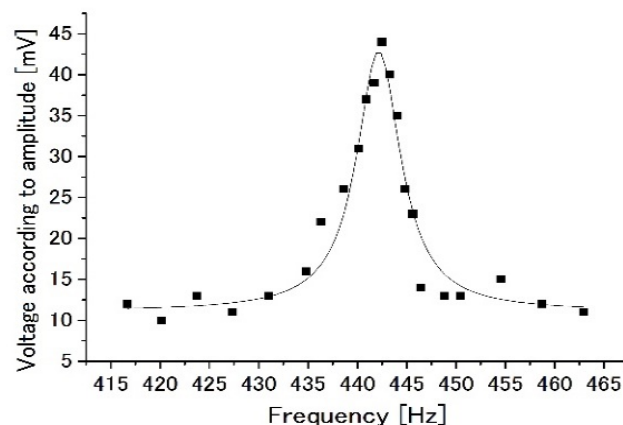


Fig.7 Voltage according to amplitude as a function of frequency for excitation.

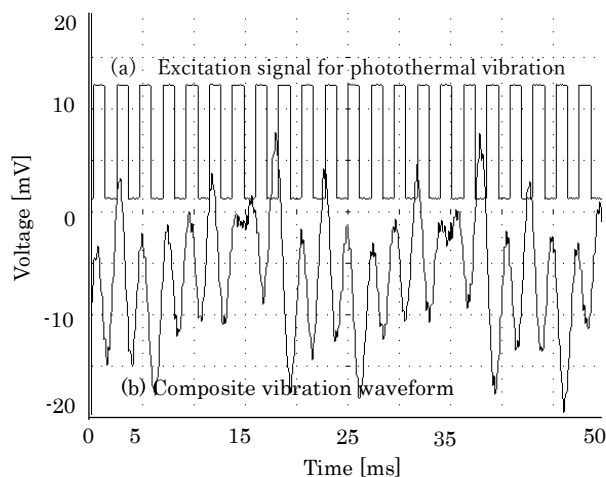


Fig.8 Composite vibration waveform.
(photothermal:442Hz mechanical:50Hz)

参考文献

- 1) 津田浩、佐藤英一、中島富男、佐藤明良：光ファイバ広帯域振動検出システムの開発—FBG センサを用いたひずみ・AE 同時計測技術—Synthesiology, Vol.6, No.1, pp.45-54, 2013.
- 2) 熊崎裕教、稲葉成基、非対称断面グレーティングファイバによる低周波振動検出、平成 29 年度電気関係学会東海支部連合大会 メカトロニクス技術 J2-7 (2017.9)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hironori Kumazaki, Takato Sugiyama, and Hisakazu Oguri,	4. 巻 Vol.30 No.1
2. 論文標題 Dependence of reflection wavelength shift of resin-embedded grating fiber on resin material	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 111-118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://dx.doi.org/10.18494/SAM.2018.1640	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hironori Kumazaki
2. 発表標題 Vibration measurement system using an always vibrating FBG built-in sensor driven by photothermal energy
3. 学会等名 OFS-26 26th International Conference on Optical Fiber Sensors（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 熊崎裕教，稲葉成基、
2. 発表標題 非対称断面グレーティングファイバによる低周波振動検出
3. 学会等名 電気学会東海支部連合大会 メカトロニクス技術 J2-7
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----