

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：32690

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14930

研究課題名（和文）ヘテロコア光ファイバセンサを応用した低周波振動モニタリングの研究

研究課題名（英文）Low-frequency vibration monitoring based on hetero-core fiber optic sensor

研究代表者

山崎 大志（Yamazaki, Hiroshi）

創価大学・理工学部・助教

研究者番号：30822663

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、次世代インフラメンテナンスの実現に向けて、ロバスト性とコスト効率に優れたヘテロコア光ファイバセンサを応用した加速度センサを開発し、インフラ構造物が発する低周波振動のモニタリング性能を検証した。本研究を遂行するにあたり、ヘテロコア光ファイバセンサが μ 相当の微小歪みまで検出可能であることを実証し、1 kHz以下の周波数帯域で加速度計測が可能なセンサを開発することに成功した。また、提案技術の実地検証として、高架橋下に加速度センサを設置し、車両走行時の加速度波形から橋梁の健全性診断の指標となりうる固有振動数及び変位推定を行い、構造ヘルスマニタリングにおける本提案技術の有用性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本申請研究で開発した光ファイバ加速度センサは、既存の電気センサに匹敵するコストパフォーマンスとノイズフリーなセンシングを実現し、過酷環境下で長期的な運用が求められる次世代インフラメンテナンスの要求に応える新たな光ファイバセンサIoTデバイスといえる。本提案技術では、コンクリート構造物やモータ・エンジンなどの機械が発する1 kHz以下の振動計測が可能であり、車両走行時における数 Hz程度の橋梁の振動モニタリングを通して実環境での有用性を示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed an accelerometer based on a hetero-core optical fiber sensor, which has excellent robustness and cost efficiency, and verified its performance in monitoring low-frequency vibrations emitted by infrastructure structures in order to contribute to next-generation infrastructure maintenance systems. To carry out this research, it has been demonstrated that the hetero-core optical fiber sensor could detect even small strains equivalent to μ , and furthermore can measure acceleration in a frequency band of 1 kHz or lower. As a practical verification of the proposed technology, we installed the proposed accelerometer on an bridge, and estimated the natural frequency and displacement of the bridge from the acceleration waveform when a vehicle run on the bridge, which could be an index for diagnosing the health of the bridge.

研究分野：光ファイバセンサ

キーワード：光ファイバセンサ 構造ヘルスマニタリング 異常診断 ヘテロコア 加速度センサ

1. 研究開始当初の背景

構造物の健全性を「見える化」する構造ヘルスマニタリング技術は、高度経済成長期に数多く建設されたコンクリート建造物の経年劣化と点検技術者の不足に伴い、喫緊の課題とされている。構造ヘルスマニタリング技術の重要な基盤要素であるセンサは、それ自体が取得するデータの信頼性がモニタリングシステム全体の性能を大きく左右する。また、橋梁だけでも全国で75万橋を超える膨大な数の社会インフラを点検・監視するためには、導入・維持面でコスト・エフェクティブであり、特別な知識技術を必要とせず点検技術者が扱える簡便性であることも同時に求められる。

これまで、我が国を支える様々なインフラの点検・管理を自動化するために、様々なセンサが提案されてきたが、落雷や浸水、激しい温度変動など、既存の電気センサでは長期的な運用を保証することは極めて難しい。そのため光ファイバセンサに代表される非電氣的センサの実用化が期待されているが、製造・運用コストが電気センサに比べて極めて高く、インフラメンテナンス分野に広く普及するには至っていない。

申請者は、低伝送損失・光強度変調方式でかつ緩やかな曲げをセンシングすることができるヘテロコア光ファイバセンサを応用し、変位、圧力、傾斜、水位などさまざまな物理センサ、さらには構造物に神経のように組み込む一体型柔軟触覚センサの開発に従事してきた。ヘテロコア光ファイバはコア径の異なるファイバ同士を融着接続させることでコア内伝送光の一部がクラッドに漏れいする構造をしている。これまでコア径の組み合わせとヘテロコア挿入長を調整することで低伝送損失かつ線形性の高いセンシング性能が実証されてきた。ヘテロコア光ファイバセンサは、電磁ノイズ、温度変動の影響をほとんど受けず、かつLEDとフォトダイオードによる省電力かつシンプルな構成で計測が行うことができる。

構造ヘルスマニタリングにおいて加速度センサは、センサを構造物に設置するだけで構造物の固有モード解析やイベント検出、変位・速度推定を行うことができ、エンジンやモータの非破壊検査や、コンクリート建造物の健全性診断に用いられる。そこで、これらの構造物が発する1kHz以下の低周波振動をヘテロコア光ファイバセンサで計測することができれば、環境フリー・長期的な運用を目指す次世代インフラメンテナンスの実現に貢献できる。

2. 研究の目的

本申請研究の目的は、環境フリー・長期運用に優れた次世代インフラメンテナンスの実現可能性を開拓すべく、最も重要な基盤要素の一つであるセンサに着目して、構造物が発する低周波振動のモニタリングが可能なヘテロコア光ファイバ加速度センサを開発することである。これまでヘテロコア光ファイバ変位センサを加速度計測に応用することで、10Hz以下かつ0.01m/s²オーダーの振動計測は成功しているが、周波数レンジを1kHz以下にまで広げられれば、極低周波の固有振動数をもつコンクリート建造物だけでなく、エンジン・モータ等の機械の非破壊検査にも応用することができる。本申請研究では、ヘテロコア光ファイバを応用したいいくつかのセンサ方式の感度・周波数応答特性を調査し、ヘテロコア光ファイバ加速度センサの感度・周波数レンジの設計指針を確立とともに、実環境における振動モニタリングを想定した計測システムを構築する。

3. 研究の方法

本申請研究を遂行するにあたり、(1)変位-曲げ変換機構の改良によりセンサ感度の向上を図り、(2)振り子方式・ファイバ梁方式・マイクロフォン方式という3通りのセンサ形態を考案し周波数応答特性に基づいてセンサ性能の評価を行った。さらに(3)実環境において橋梁を対象にした車両走行時の振動モニタリング試験を実施し、計測データに基づく固有振動数の推定および速度・変位推定を行った。

4. 研究成果

4.1 ヘテロコア光ファイバ変位センサの高感度化(新型光ストレインゲージの提案)

これまでのヘテロコア光ファイバセンサは数 μm ~数 mm の変位に対して0.1%FSの繰返し精度で線形的な光損失応答性を有していたが、例えば周波数が1kHzかつ最大振幅 $1g$ (9.8 m/s^2)で正弦振動する物体の変位振幅は0.25 μm 程度しかなく、周波数が高いほど高感度であることが求められる。ヘテロコア光ファイバセンサの感度を上げる方法として、コア径の組み合わせを変えるか、ヘテロコア挿入長を長くする方法がこれまで報告されているが、いずれも伝送損失の増加や線形性の低下とトレードオフである。一方、図1に示すように、変位-曲げ変換機構においてヘテロコア部左右のクランプ間距離(L_0)を変えて L だけ距離を縮めていくと、クランプ間距離の変化率(L/L_0)に対する光損失の変化率は、初期のクランプ間距離が短いほど増大する

ことが明らかとなった。この結果は、クランプ間距離を短くすることでヘテロコア光ファイバセンサの変位（あるいは歪み）に対する感度が格段に向上することを示唆しており、低伝送損失性と線形性を保持したままセンサ感度を上げることに成功した。また、本手法を応用して μ 単位の歪みを検出できることを実証し、新型光ストレインゲージの原型を提案するに至った。

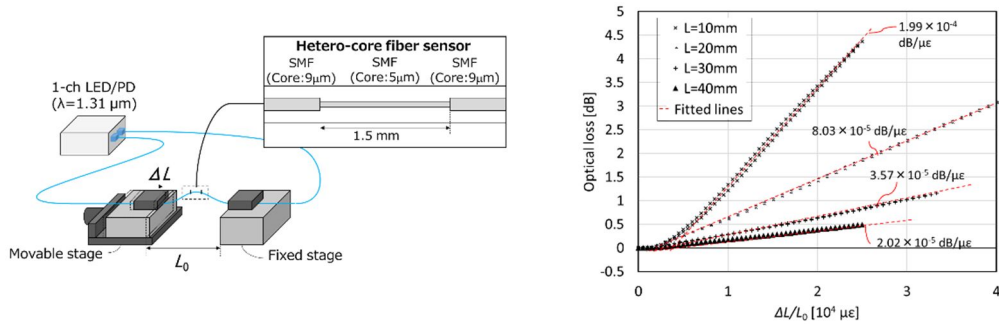


図1 (左) ヘテロコア光ファイバセンサの変位-曲げ変換構成、(右) クランプ間距離の変化率 (L/L_0)に対するセンサの光損失変化

4.2 各センサ形態における周波数応答特性の評価

申請当初に提案した3センサ方式のうち、(1)振り子方式、(2)ファイバ梁方式を採用し、センサ開発を行った。(1)振り子方式では、4.1の成果をもとに開発した光ストレインゲージをカンチレバー型の振動子に固定する方法を採用した。図2に示すように、幅250mmの金属板に光ストレインゲージを固定し、金属板の片端を押下した後に開放すると、板の振動をストレインゲージが感受して過渡振動の波形を光損失変化として再現することがわかった。図3に上記の構成を小型化したセンサ筐体及び周波数応答特性を示す。図3(左)に示すセンサは、内部に長さ $L = 25\text{--}30\text{ mm}$ のカンチレバーを備えており、ヘテロコア光ファイバをカンチレバーに固定することで加振時のカンチレバーのたわみを検出する。センサの周波数応答特性は、カンチレバーの機械振動特性に従って300 Hz - 1 kHzの共振周波数を有し、それ以下の周波数帯で安定したセンサ感度を有することが判明した。

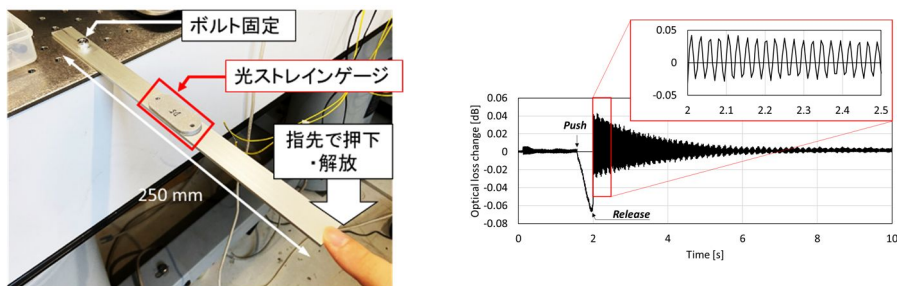


図2 光ストレインゲージによる金属板の振動波形計測

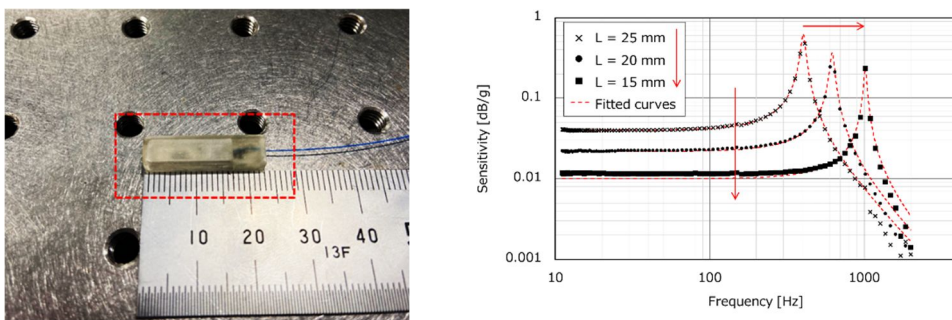


図3 (左) カンチレバー型加速度センサ、(右) カンチレバー長(L)に対するセンサの周波数応答

(2)ファイバ梁方式では、ファイバの形が円弧を描くように固定した伝送型センサ(図4(左))と、ファイバ終端に鏡面加工を施した反射型センサ(図4(右))をそれぞれ試作した。いずれのセンサも振動子兼センシング部であるファイバと支持部のみで構成されるため、振り子方式に比べて簡素な構造であり、可撓性に優れた石英ガラスファイバの機体的性質をそのまま生かせる利点がある。また、伝送型センサはファイバを円弧状に支持したことでセンサ感度の異方向性が得られ、多軸の加速度センシングへの応用が示唆された。また反射型センサはファイバ直径(250 μm 程度)に匹敵する非常に小さなセンサの実現が期待できる。

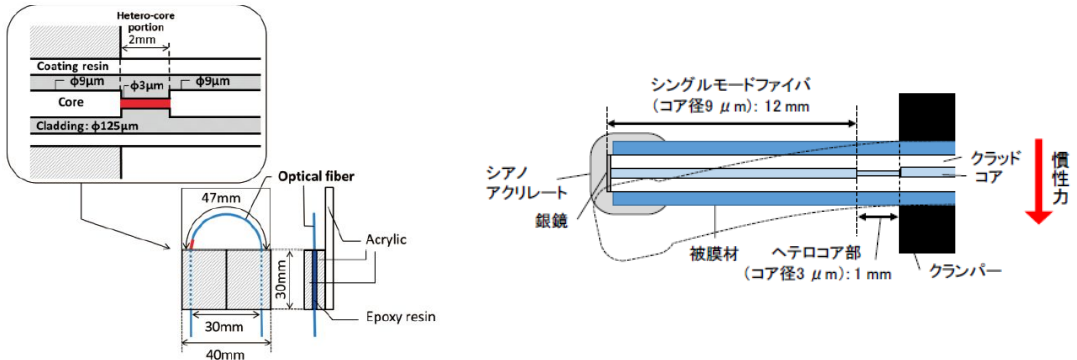


図4 ファイバ梁方式の加速度センサ例。(左)伝送型センサ、(右)反射型センサ

4.3 実環境下における橋梁の振動モニタリング

低周波振動モニタリングの実証試験として、高架橋の径間中央部において走行車両が通過する際に生じる加速度の計測を行い、橋梁の健全性診断における重要な評価指標である固有振動数、変位応答の測定性能を検証した。図5に加速度センサ及び参照用加速度センサ、変位センサの配置を示す。測定対象となる橋梁は径間長が30m程度の単純鋼鉄桁であり、固有振動数はおおよそ4.2Hz程度と推定される。本試験では、20t ダンプカーを40km/h、60km/h、70km/hの3通りの速度で走行させ、その間に各種センサで加速度及び変位を測定した。開発した加速度センサの取得データは、センサ固有の共振周波数をローパスフィルタでカットし、さらに時間積分により生じる長周期ノイズを除去するためにローカットフィルタを用いて二階積分を行い、加速度データから変位量を算出した。結果として、図5(右)に示すように、開発した加速度センサの取得波形(黒)と参照用加速度計の取得波形(赤)はよく一致しており、おおよそ3.4 Hz程度の周期振動を観測することに成功した。想定していた固有振動数に比べて小さいが、橋梁の固有振動に由来する波形であると考えられる。また、変位データを比較すると1秒以上の周期をもつ緩やかな変位は、開発した加速度センサと参照用センサとで一致せず、今後は長周期的な揺れに対して開発したセンサの性質をさらに検討する必要がある。

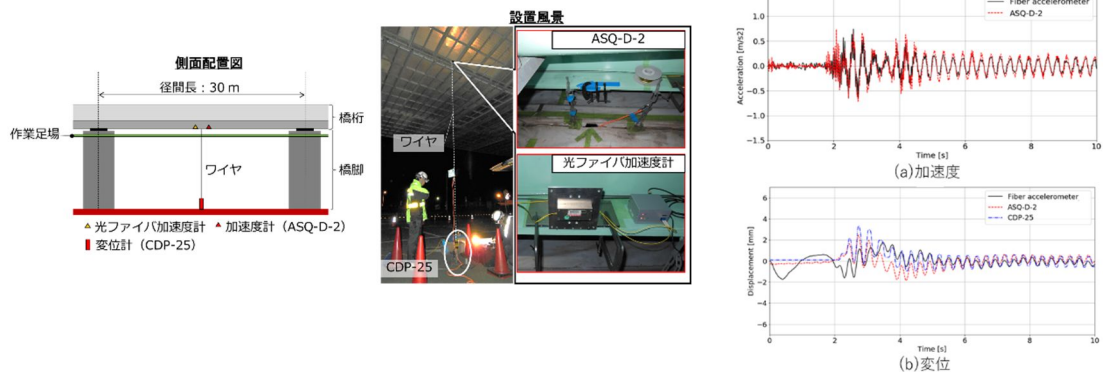


図5 高架橋の車両走行時振動モニタリング。(左)センサ配置図、(右)計測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名 Hiroshi Yamazaki, Kazuhiro Watanabe | 4. 巻 20 |
| 2. 論文標題 Optical strain gauge based on a hetero-core fiber macro-bending sensor | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal | 6. 最初と最後の頁 13387, 13393 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSEN.2020.3005139 | 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 山崎大志、渡辺一弘 | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 ヘテロコア式光ストレインゲージとIoT展開 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 光アライアンス | 6. 最初と最後の頁 52、56 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 山崎大志、渡辺一弘 | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 ヘテロコア光ファイバ・ストレインゲージ（特集 光技術計測） | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 光技術コンタクト | 6. 最初と最後の頁 20、24 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 渡辺一弘, 関篤志, 山崎大志, 西山道子, 近 哲也, 佐々木博幸 |
| 2. 発表標題 ヘテロコア技術を用いた光デバイスと社会実装への展開 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会2020年総合大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 門倉美幸, 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘 |
| 2. 発表標題 両端固定支持によるヘテロコア光ファイバ式加速度計の曲率半径による周波数特性への影響 |
| 3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 松尾明人, 門倉美幸, 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘 |
| 2. 発表標題 カンチレバー型ヘテロコア光ファイバ加速度センサのたわみに対する応答特性 |
| 3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 門倉美幸, 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘 |
| 2. 発表標題 両端固定支持によるヘテロコア光ファイバ式振動センサを用いた機械振動応答評価 |
| 3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘 |
| 2. 発表標題 ヘテロコア光ファイバセンサ式ストレインゲージに関する基礎検討 |
| 3. 学会等名 応用物理学会第64回光波センシング技術研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山崎大志, 渡辺一弘, 佐々木博幸, 岩佐宏一, 澤健男 |
| 2. 発表標題 ヘテロコア型光ファイバ加速度センサによる高架橋振動測定の実験的検証 |
| 3. 学会等名 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山崎大志、渡辺一弘 |
| 2. 発表標題 ヘテロコア光ファイバストレインゲージによる加速度計測の提案 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会光ファイバ応用技術(OFT)研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 雙松伸一、山崎大志、渡辺一弘 |
| 2. 発表標題 Sigfoxネットワークとヘテロコア光ファイバセンサを組み合わせたIoTモニタリングシステムの提案 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会光ファイバ応用技術(OFT)研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Miyuki Kadokura, Hiroshi Yamazaki, Michiko Nishiyama, Kazuhiro Watanabe |
| 2. 発表標題 Frequency characteristics of hetero-core fiber accelerometer with two orthogonal vibrational modes of an arch shape beam structure |
| 3. 学会等名 IEEE SENSORS 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akihito Matsuo, Miyuki Kadokura, Hiroshi Yamazaki, Michiko Nishiyama, Kazuhiro Watanabe |
| 2. 発表標題 Sensitivity and resonance frequency evaluations for a cantilever type hetero-core fiber optic accelerometer |
| 3. 学会等名 IEEE SENSORS 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 門倉美幸、山崎大志、西山道子、渡辺一弘 |
| 2. 発表標題 両端固定支持によるヘテロコア光ファイバ式加速度センサの振幅応答特性の評価 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会光ファイバ応用技術(OFT)研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

| | | |
|---------------------------------|-------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 光ファイバセンサ | 発明者 山崎大志, 渡辺一弘 | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-165072 | 出願年 2019年 | 国内・外国の別 国内 |

〔取得〕 計0件

〔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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|