

ヘテロコア光ファイバ 加速度計に関する研究

2023 年 3 月

門倉 美幸

目次

第 1 章 序論	- 1 -
1.1 研究背景	- 1 -
1.2 研究目的	- 2 -
1.3 論文構成	- 2 -
第 2 章 構造ヘルスマニタリング	- 3 -
2.1 緒言	- 3 -
2.2 振動モニタリング技術	- 3 -
2.3 従来の加速度計	- 3 -
2.3.1 MEMS 加速度計	- 3 -
2.3.2 光ファイバセンサ	- 5 -
第 3 章 両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ 3 軸加速度計	- 10 -
3.1 緒言	- 10 -
3.2 両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の構成	- 10 -
3.3 強制変位特性	- 12 -
3.3.1 実験構成	- 12 -
3.3.2 実験結果	- 14 -
3.4 周波数および加速度振幅応答特性	- 18 -
3.4.1 実験構成	- 18 -
3.4.2 有限要素(FE: Finite Element)解析	- 19 -
3.4.3 周波数応答特性	- 22 -
3.4.4 加速度振幅応答特性	- 26 -
3.5 3 軸加速度計	- 29 -
3.5.1 3×3 感度マトリクスの算出のための周波数および加速度振幅特性	- 29 -
3.5.2 性能評価	- 34 -
3.6 結言	- 37 -
第 4 章 低周波領域における両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ 加速度計の感度向上 ...	- 43 -
4.1 緒言	- 43 -
4.2 センサ構成	- 43 -
4.3 周波数応答特性	- 43 -
4.3.1 実験構成	- 43 -
4.3.2 実験結果	- 45 -
4.4 有限要素(FE)解析	- 48 -
4.5 結言	- 52 -
第 5 章 センサの時間応答周波数の違いに着目したマルチモーダル計測への応用	- 53 -
5.1 緒言	- 53 -
5.2 センサ構成	- 53 -
5.3 複数点のセンサ応答情報識別手法	- 54 -

5.4 LD 光源を用いたマルチモーダル計測	- 55 -
5.5 LED 光源を用いたマルチモーダル計測	- 57 -
5.6 結言	- 58 -
第 6 章 結論	- 60 -
参考文献	- 62 -
謝辞	- 67 -
著者論文および文献目録.....	- 68 -

第1章 序論

1.1 研究背景

産業機械や機器が発する振動を追跡することは、故障の早期発見にとって不可欠である。これまでに、ガスタービンやポンプなどの回転機器設備の故障診断や潜在的な損傷検出のために、振動センサや加速度計を用いた振動モニタリングが提案されている[1-2]。振動モニタリングを行うことにより、振動の振幅や周波数、強度の変化を測定することで機械や機器のアンバランス、緩み、ミスアライメントやベアリングの摩耗を故障前に発見することができ、重大な事故を未然に防ぎ、損害を抑えることが可能である。また、航空機におけるメンテナンスにおける一般的な方法としては、目視検査に非破壊検査(NDT: Non-destructive testing)方法を加え主要部品の状態をチェックするものであるが、金属材料である場合はほとんどの場合は目視で判断できる。しかし、航空機に用いられる金属材料は近年ではより一般的な複合材料に置き換えられ、剥離などの多くの故障が構造内部で発生し、目視では発見できないため非破壊かつ自動で損傷を検出する技術が必要となる[3]。その技術の一つとして、構造物のモード特性に基づき構造物の局所的及び全体的な挙動を測定する構造ヘルスマニタリング(SHM: Structural Health Monitoring)が挙げられる[4]。このような振動ベースの状態監視にはビルや橋梁、トンネルといったインフラにおいても注目が集まっている[5]。さらに、ロケットや宇宙機のエンジン内のガス圧や燃料タンク・胴体の歪みに関する SHM 技術も開発されており[6]、航空宇宙機においては、飛行システムの軽量化・小型化が望まれている。特に、航空宇宙用途では、再使用型ロケット(RLVs: Reusable Launch Vehicles)がコストダウンして使用されることが多い。そのため、RLVs の構造健全性監視には、潜在的な損傷を避けるために、コストパフォーマンスが高く、長期間使用可能なセンサが必要である。

振動計測には一般的に加速度計が用いられるが、加速度計には電気式の静電容量型や圧電型のもものが幅広く用いられている[7]–[8]。また、光ファイバセンサを用いた加速度計も数多く提案されてきている[9]–[12]。光ファイバは細径・軽量・柔軟といった機械的な特徴に加え、電磁干渉や化学腐食に耐性を有している[13]–[15]。そのため、様々な分野への応用が期待され、電気式の代替センサとして開発されてきている[16]。光ファイバセンサには Fiber Bragg Grating(FBG)[17]–[21]やファブリ・ペロー干渉に基づく光ファイバセンサ[22]–[24]が提案されている。これらの光ファイバセンサは感度が高いといった利点を有する一方、FBG は温度変動も同時に検出してしまうため温度補償が必要である。また、FBG とファブリ・ペロー干渉に基づくセンサは波長シフトの検出が必要であるため、計測コストが増大する。

一方、光強度ベースの計測が可能であるヘテロコア光ファイバセンサが提案されてきており、コストパフォーマンスが高いといった利点を有している。さらに、センサ長が 1–2 mm 程度であることから、シリカガラスの熱膨張に起因する温度の変化による影響をほぼ受けないため、温度補償が不要であるといった特徴を有する[25]–[26]。ヘテロコア光ファイバセンサを用いた加速度計はこれまでに、低周波振動を計測対象としている振り子型[27]、回転機器などの異常診断のための中・高周波を計測対象とした両端固定支持梁構造[28]–[29]や、片持ち梁型[30]が提案されてきている。振り子型の形態は錘やベアリングなどの機構からなるセンサシステムであることから、構成が複雑になるといったことや、片持ち梁型の形態は全方向の曲げ変形に対して光損失が生じるため、振動方向の検知が困難であるといった問題点を有している。そのため、感度の異方性を持たせるためには光ファイバ以外に振動による変形

に異方性のある機構を有する必要がある。また、これまでに報告されている両端固定支持梁構造では感度が低いため、高感度化が必要であるといった課題を有する。

1.2 研究目的

本論文の目的は、光強度ベースの計測が可能でコストパフォーマンスが高い計測システムを有するヘテロコア光ファイバセンサを応用し、1方向に高い感度をもつヘテロコア光ファイバ加速度計の実現と3軸加速度計としての有用性、及びマルチモーダル計測への応用の実現可能性を示すことである。本研究では、光ファイバの剛性を利用したシンプルなセンサ構成で、3方向の加速度を検知するために振動方向が検知可能な両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計を提案し[31]、3軸加速度計としての性能を実験的に評価した[32]。また、大型構造物の損傷検知を行う際には低周波領域におけるモニタリングが必要となるため、低周波領域における感度向上を目指し、両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバに付加質量を設置した加速度計の提案をする[33][34]。さらに、光ファイバ1ライン上に複数のヘテロコア光ファイバセンサを設置することで、より軽量化が可能であると考えられる。そこで、本論文では、マルチモーダル計測への応用の実現を目指し、加速度と液体付着を同時に検出するために、ヘテロコア光ファイバ加速度計と液体検知センサをファイバ1ライン上にタンデムに設置し、得られた実時間応答から、時間周波数応答の違いに着目しそれぞれの情報を抽出可能な手法を提案する[35]。

1.3 論文構成

本論文では、研究成果を全6章で構成し報告する。

第1章では、産業分野や航空宇宙分野、インフラにおける回転機器や大型構造物における異常診断およびヘルスマニタリングに関して研究動向について述べ、本研究の意義を述べた。

第2章では、回転機器の異常診断や大型構造物のSHMの関連研究と、振動モニタリング技術に用いられる電気式と光ファイバ式加速度計の具体例について紹介する。

第3章では、感度向上と感度に異方性を持たせることを目指した、半円型の両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の提案をし、強制変位特性、周波数応答特性、加速度振幅応答特性といった加速度計としての基本的な特性を明らかにし、3軸加速度計へ拡張し、加速度計としての性能を明らかにした。

第4章では、低周波振動を計測対象に絞り、感度向上を目指したセンサ構成を提案し、周波数応答特性、構造解析モデルの整合性を示した。

第5章では、これまでに提案してきた加速度計に加え、時間応答周波数の異なるヘテロコア光ファイバセンサを用い、マルチモーダル計測への応用について検討した。

第6章では、これらの研究成果の結論を示し、提案光ファイバ加速度計がシンプルなセンサ構成で感度に異方性を持たせることに成功し、光ファイバ加速度計の社会実装の可能性を大きく開いたことを述べた。

第2章 構造ヘルスマニタリング

2.1 緒言

本章では、回転機器の異常診断や大型構造物のためのヘルスマニタリングの関連研究とこれらに用いられる加速度計について述べる。

2.2 振動モニタリング技術

回転機器におけるモニタリングや早期異常診断、大型構造物のヘルスマニタリング(**Structural Health Monitoring : SHM**)においては振動ベースのモニタリングシステムが数多く提案されてきており[4-6]、一般的には周波数領域、時間領域、時間周波数領域の3つのアプローチに分類され[36]、振動情報を取得するには、加速度計が幅広く用いられている[7-8]。

回転機器におけるモニタリングシステムにおいては、機械の欠陥は特徴的な振動が発生するため、通常の稼働時の振動と比較することで故障検知が可能である。振動の信号に対して、周波数分析を行い、得られたスペクトルを更に処理することによって正確な診断情報を得ることが可能である。故障していない正常に稼働している回転機器の振動スペクトルは、**Fig. 2.1** に示すように、軸の回転数に該当する周波数とそれに続くいくつかの高調波によって特徴付けられる。あらゆる種類の機械的な故障は、故障していないときのスペクトルと比較し、特定の変化を引き起こす[37]。大型構造物のヘルスマニタリングは、構造物の機能状態や構造応答に関する統計情報を提供するシステムとなっており、歪や回転、温度、湿度、加速度などの構造応答を経時的に計測するためのセンサが使用されている[38]。大型構造物のSHMにおける加速度の計測システムにおいては0.001–1 gの広い加速度範囲と0.1–10 Hzの低周波数に対する感度が要求される[39]。また、航空機の様々な構造部品における識別可能な振動のパターンはおおよそ5 Hz–1 kHzであり[40]、幅広い周波数範囲での加速度が計測可能な計測システムが求められる。

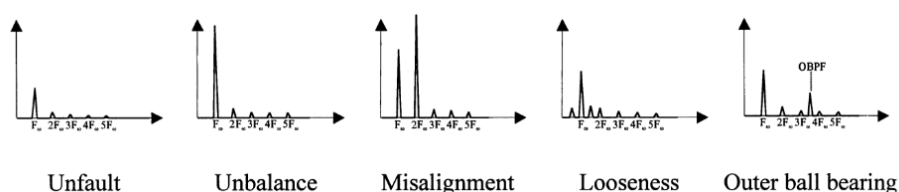


Fig. 2.1 Qualitative vibration spectra in unfaulty condition and in presence of some typical faults [37].

2.3 従来の加速度計

2.3.1 MEMS 加速度計

近年のMicro Electro Mechanical System(MEMS)の進歩により、民生機器やウェアラブルヘルスケア、自動車など様々な電子工学用途のセンサを幅広く開発することが可能になった。特に慣性センサは自動車や民生機器に幅広く用いられている[41]。MEMS 加速度計は小型、軽量、高い計測精度、大量生産が可能で集積度が高いといった利点を有しており[42]、次に示すピエゾ抵抗式、静電容量式や共振式、光学式といった種類の加速度計が研究されてきている。しかし、過酷で極端な環

境条件に対する耐性が限られており, さらに加速度計のケーブルが非常に長い場合には信号の劣化や電氣的なノイズにより, 特に精度に問題が生じる可能性がある[43].

2.3.1.1 ピエゾ抵抗式

半導体や金属の結晶に外力を加えることによって電気抵抗が変化する piezo 抵抗効果を基本原理とした MEMS piezo 抵抗式加速度計について述べる. 誘導成分は, 感応膜または感応梁上に作製されたバリスタと呼ばれる 2 つの電極を持つ電子部品である[42]. Fig. 2.2 に質量を 4 本の対照的な片持ち梁で吊るした構造を示す. 4 つのシリコン piezo 抵抗器が片持ち梁に埋め込まれており, 加速度によって梁に生じる応力を抵抗値の変化として検出する[44].

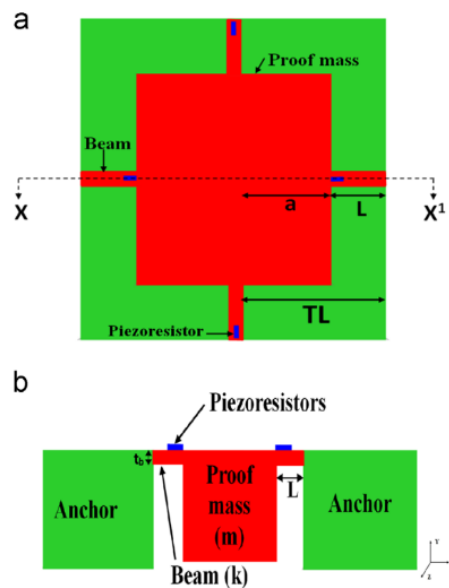


Fig. 2.2 (a) Top view of the MEMS piezoresistive accelerometer and (b) cross sectional view of the MEMS piezoresistive accelerometer across XX^1 [44].

2.3.1.2 静電容量式

静電容量式加速度計は, 印加された加速度に応じて電気容量が変化することを利用したものである. 検出原理を Fig. 2.3 に示す. 重さ m の物質に働く力 F は加速度 a を用いると, $F = m \times a$ と表すことができる. 錘とバネで構成されているものを考えると, バネ定数 k と伸縮距離 x を用いると, $F = k \times x$ と表すことができ, これらの式を用いると, $a = \frac{k \times x}{m}$ と表すことができる. この錘の移動距離を計測することで加速度を算出可能である[45]. MEMS 静電容量式加速度計では, 対になっているプレートコンデンサの特性を利用する. 各コンデンサの一方を固定し, もう一方のプレートをバネの間にある質量に取り付ける. Fig. 2.4 に示すように, 複数のコンデンサのペアの固定されていないプレートを同じ質量に取り付けており, 外部からの印加加速度によって質量が変位するため, コンデンサのプレート間隔の距離が変化することで静電容量が変化し, 向き合うコンデンサの値の差が, 加えられた加速度に比例して変化する[46].

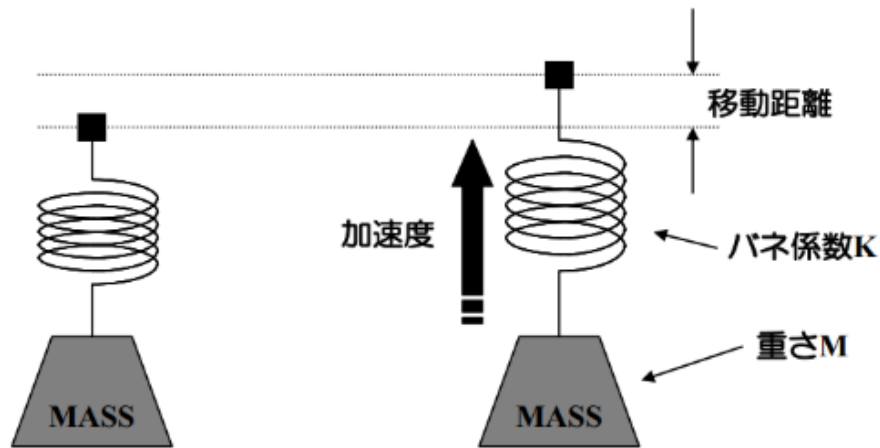


Fig. 2.3 Principle of capacitive accelerometer detection [45].

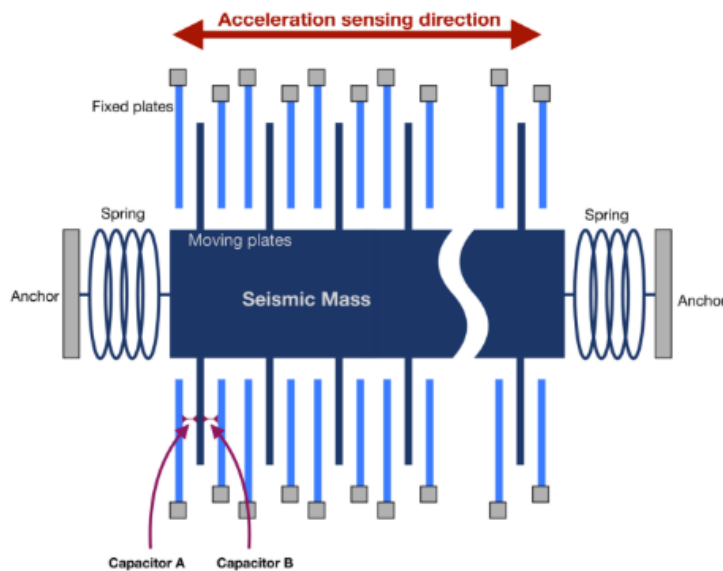


Fig. 2.4 Working principle of a capacitive accelerometer [46].

2.3.2 光ファイバセンサ

光ファイバは細径・軽量・柔軟といった機械的な特徴を有している。加えて、電磁干渉や化学腐食に耐性を有していることから、様々な分野へのセンサとしての応用が期待され、電気式の代替センサとして研究されてきている[16]。そこで、光ファイバセンサの代表的な技術である **FBG** センサと本研究の根本技術となるヘテロコア光ファイバセンサについて述べる。

2.3.2.1 Fiber Bragg grating (FBG)

Fiber Bragg grating (FBG)は温度と歪の両方に敏感であり[47]、その特性から温度、変位、加速度などの多くの物理量を間接的に計測可能である。**FBG**は光ファイバのコアに **Ge** イオンがドープされた光ファイバに対して紫外レーザーを照射することで光ファイバのコアに屈折率変調を形成したものである。**Fig. 2.5**に示すように、入射光が **FBG**を通過する際に、ブラッグ波長において反射が生じ、それ以外の波長成分は透過する原理である[48]。

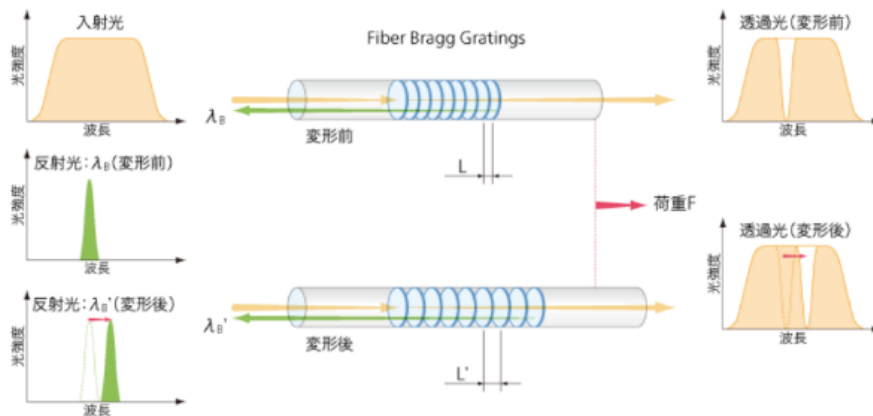


Fig. 2.5 FBG sensor principle [48].

FBG センサを用いた加速度計の例を Fig. 2.6 に示す. この加速度計は 2 つのヒンジ構造が用いられており, 質量のブロックと 2 つの柔軟なヒンジを並列に配置されたものである. ベースと質量マスの中に FBG が設置されており, その両端をベースと質量マスに接着されている. 加速度が印加された際に質量マスが加速度の力を受けてヒンジが変形することで FBG にひずみが生じる原理になっている [49].

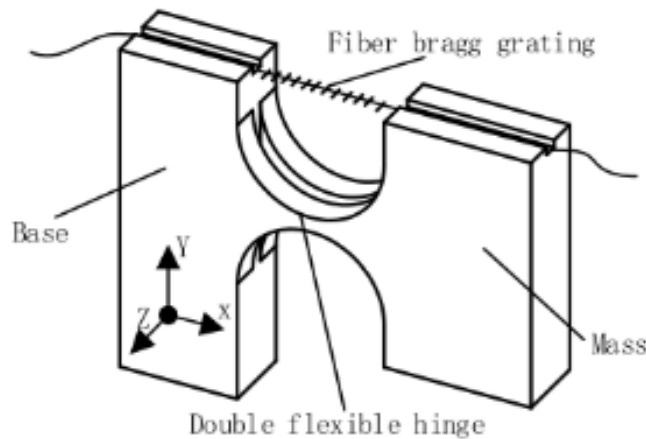


Fig. 2.6 Schematic diagram of double flexible hinges structure accelerometer [49].

2.3.2.2 ヘテロコア光ファイバセンサ

光ファイバ伝送路と伝送路のコア径と異なるコア径のヘテロコア部と呼ばれる光ファイバ小切片から構成される構造である, ヘテロコア光ファイバセンサがこれまでに提案されてきている[50]–[54]. ヘテロコア部と呼ばれるコア径が異なる部分に緩やかな曲げが生じた際に, 伝搬光が漏洩し, 曲率変化に対して鋭敏に光損失変化が生じる. ヘテロコア光ファイバセンサの曲率変化に対する感度は, コア径の組み合わせやヘテロコア部の挿入長によって決まることがこれまでに報告されている[55]. Fig. 2.7 に示すように, ヘテロコア部の両端を 35 mm 間でクランプし, クランプされた片側をもう一方に近づけた際に, ヘテロコア部に曲率が生じた場合の変位 d に対する光損失変化を Fig. 2.8 に示す. 伝送路フ

ファイバにコア径 $9\ \mu\text{m}$ のシングルモード(SM)光ファイバを用い、ヘテロコア部にコア径 $5\ \mu\text{m}$ の SM 光ファイバを用いた挿入長 $1\text{--}2\ \text{mm}$ 、コア径 $3\ \mu\text{m}$ の SM 光ファイバを用いた挿入長 $1\ \text{mm}$ におけるヘテロコア光ファイバセンサは変位に対して線形な光損失変化を示した。しかし、ヘテロコア部にコア径 $3\ \mu\text{m}$ の SM 光ファイバを用いた挿入長 $1.5\ \text{mm}$ におけるヘテロコア光ファイバセンサは非線形な応答を示した。Fig. 2.7 に固定間隔を L とし、両端固定を条件とした座屈モデルを示す。光ファイバ長手方向 x に対する座屈たわみ y_0 を用いて次のような正弦関数で座屈後の曲線 y を表現できる。

$$y = y_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right) \quad (2.1)$$

また、曲線の長さ L は次式のように求めることができる。

$$L = \int_0^P \sqrt{1 + \dot{y}^2} dx \quad (2.2)$$

ヘテロコア部中央部における曲率は、式(2.2)に関して、 P に $\frac{l}{2}$ を代入し、 y_0 について解くと、曲率 κ は

$$\kappa = \frac{\ddot{y}}{\{1 + (\dot{y})^2\}^{\frac{3}{2}}} \quad (2.3)$$

と求めることができる。Fig. 2.8 で得られた光損失変化を変位からこれまでの式を用いて曲率に換算した結果を Fig. 2.9 に示す。ヘテロコア部にコア径 $5\ \mu\text{m}$ の SM 光ファイバを用いた挿入長 $1\text{--}2\ \text{mm}$ 、コア径 $3\ \mu\text{m}$ の SM 光ファイバを用いた挿入長 $1\ \text{mm}$ におけるヘテロコア光ファイバセンサは曲率 0.05 以上で線形な光損失変化を示した。また、コア径 $5\ \mu\text{m}$ のヘテロコア光ファイバ小切片を用いたものは、挿入長が増加すると感度が増加していることが確認された。さらに、これらのヘテロコア光ファイバセンサよりもコア径 $3\ \mu\text{m}$ 、挿入長 $1\ \text{mm}$ のヘテロコア光ファイバセンサの方が高感度であること実験結果から分かる。このようにコア径の組み合わせや挿入長によって感度が異なる。これまでに提案されてきている振り子型[27]、片持ち梁型のヘテロコア光ファイバ加速度計[30]を Fig. 2.10, Fig. 2.11 に示す。これらの加速度計は、前述したヘテロコア光ファイバを用い、加速度が印加されることでベアリングが回転し、その回転を変位に変換したもの、もしくは加速度印加時の慣性力によって生じるヘテロコア部の曲率変化を光損失変化として検知可能である。

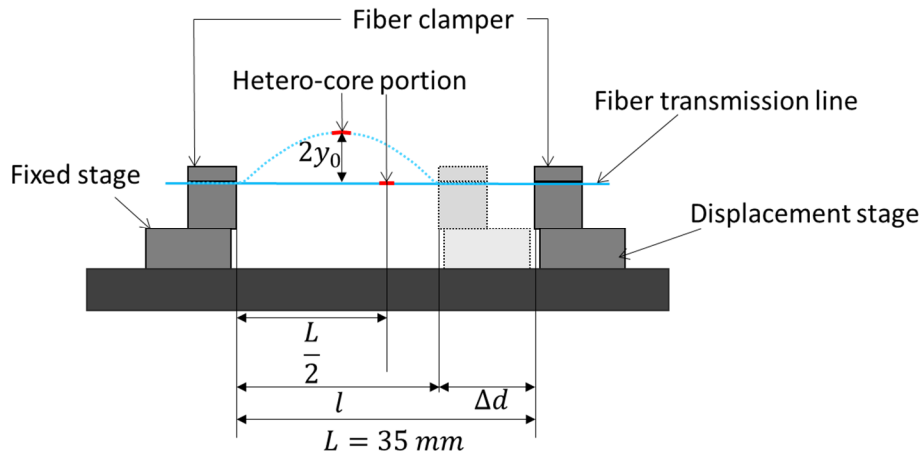


Fig. 2.7 Configuration displacement characteristics experiment of the hetero-core optical fiber.

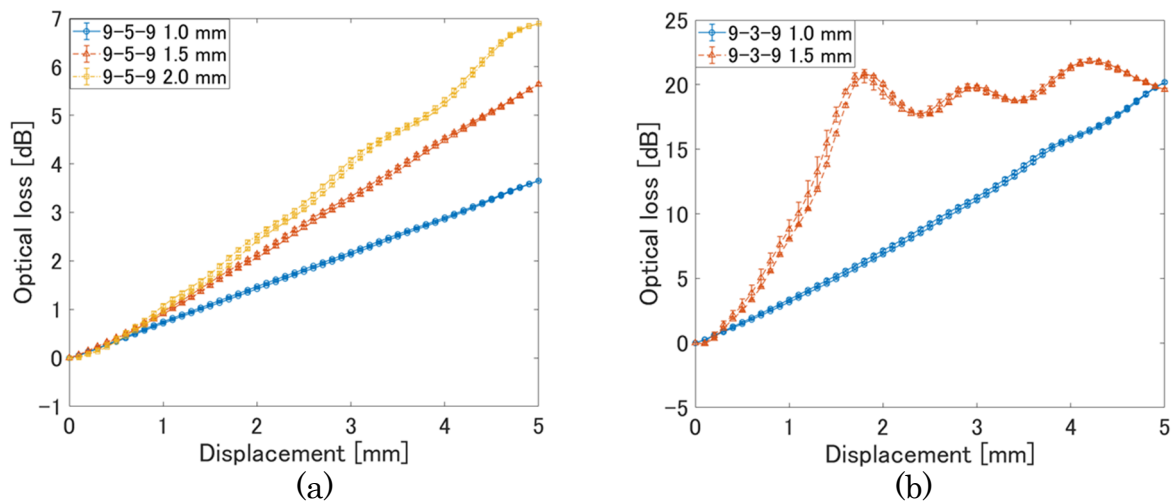


Fig. 2.8 Optical loss characteristics with respect to displacement: core diameter in hetero-core portion (a) 5 μm and (b) 3 μm.

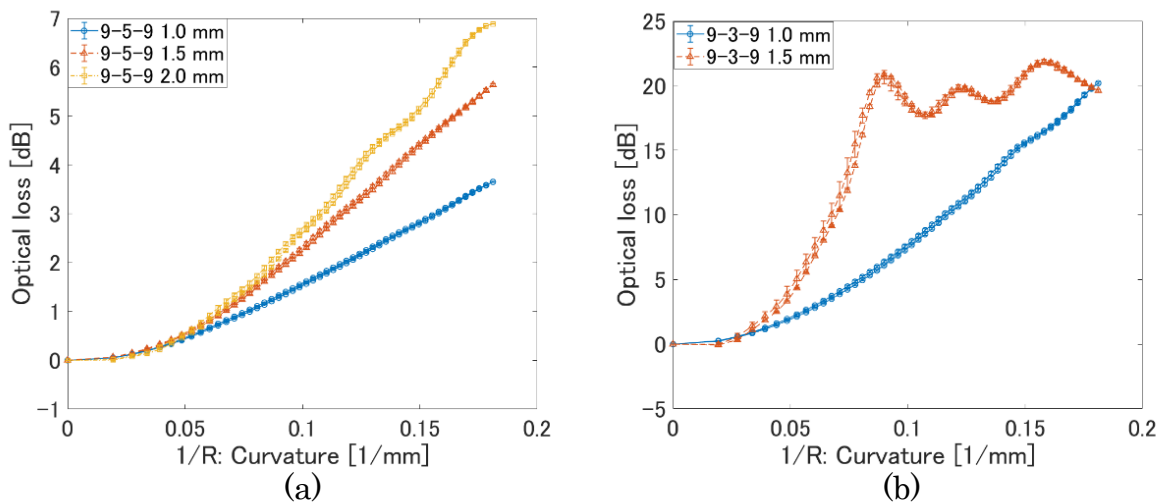


Fig. 2.9 Optical loss characteristics with respect to curvature: core diameter in hetero-core portion (a) 5 μm and (b) 3 μm.

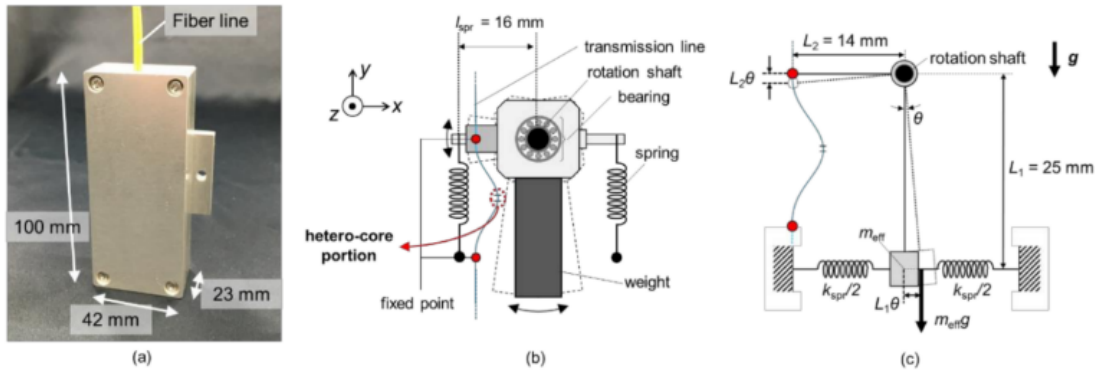


Fig. 2.10 Schematic diagram of pendulum-type accelerometer with a hetero-core optic sensor [27].

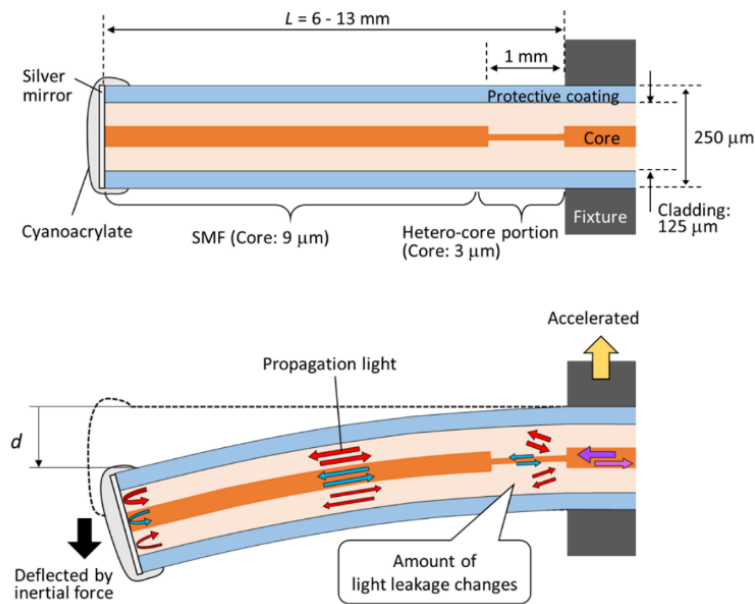


Fig. 2.11 Schematic diagram of Cantilever type accelerometer with a hetero-core optic sensor [30].

第3章 両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ3軸加速度計

3.1 緒言

本章では、回転機器の異常診断のためのヘテロコア光ファイバ加速度計の開発を目的として、これまでに提案されてきているヘテロコア光ファイバセンサを用いた半円型両端固定支持梁構造の感度向上を目指す。従来提案されてきた両端固定支持梁構造の加速度計では、半円の中心にヘテロコア部が位置しており、自由支持点を有した構成になっていることから[28]–[29]機械的強度の低下の恐れがあった。この構造に自由支持点を有さない場合、検知軸の感度が低く、本来検知したい軸以外での加速度に対する感度すなわち横感度が高いため振動方向の識別が困難である。そこで、本研究で提案するセンサ構成では、ヘテロコア部を固定端付近に設置することで感度向上が見込まれる。振動の印加方向の違いによる提案するヘテロコア光ファイバ加速度計の静的特性および動的特性による実験から曲率半径の違いによる1軸加速度計としての感度及び計測可能周波数範囲の評価を行った。また、提案加速度計の構造解析のためのモデルを作成し、有限要素解析によるシミュレーションを行い、構造解析モデルの整合性を実験結果と比較し確認した。さらに、それらの結果を踏まえ、1軸加速度計を3本用いることで3軸加速度計への拡張を行った。提案3軸加速度計に対しては2軸または3軸方向に同時に振動を与えることで、横感度の影響を実験的に調査し性能評価を行った。

3.2 両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の構成

本提案加速度計で用いられるヘテロコア光ファイバは、Fig. 3.1 に示すような、伝送路ファイバにコア径 $9\ \mu\text{m}$ の SM ファイバの任意の点にヘテロコア部と呼ばれるコア径 $3\ \mu\text{m}$ の SM 光ファイバ小切片を $1\ \text{mm}$ 挿入・融着し作製される。融着は光ファイバ融着接続機 (FSM-100M, Fujikura Ltd.) を用いた。本研究では、曲率変化に対する光損失変化に対して高感度であり、高い線形性を有しているコア径の組み合わせとセンサ長を採用した。

Fig. 3.2 に両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の構成を示す。ヘテロコア部を含む光ファイバが曲率半径 $R(=7.0, 10, 15\ \text{mm})$ の半円になるようにし、両端を接着剤(シアノアクリレート)で固定台に接着した。代表的な片持ち梁の解析モデルを Fig. 3.3 に示す。断面二次モーメント I 、ヤング率 E である梁構造において、曲げモーメント M と梁の曲率 $\frac{d^2y}{dx^2}$ との間には次のような関係が成り立つ[56]–[57]。

$$M = EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3.1)$$

また、Fig. 3.3 に示す梁の形状に対して等分布荷重 q が作用するときに曲げモーメントは次のような式が与えられる。

$$M = -\frac{q}{2}(l-x)^2 \quad (3.2)$$

そのため、曲げモーメントが最大になる箇所が曲率も最大になるため、固定端付近が最も曲率変化を生じる[58]。

そこで本研究では、ヘテロコア部が固定端の一方に位置するように固定した。Fig. 3.2に示すように、光ファイバが固定された固定台に振動が印加されると、光ファイバ自体が振動子となることでたわみ、ヘテロコア部に曲率変化が生じ光損失変化として加速度を測定することができる。そのため、光ファイバと固定台のみのシンプルなセンサ構成になっている。先行研究においては、半円の円弧の中心部にヘテロコア部が設置されており、基板に加わった振動を基板に設置された自由支持点を介して、ヘテロコア部に曲げを与えるため[28]、機械的強度の低下が懸念される。一方、固定端にヘテロコア部が位置するようなセンサ構成にすることで、ヘテロコア部における曲率が増加するため、自由支持点なしでも振動方向の検知及び感度の向上が期待できる。

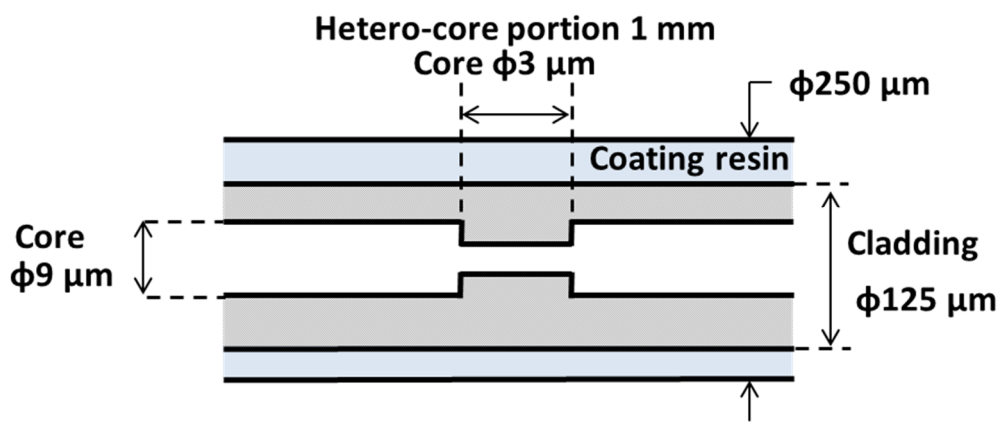


Fig. 3.1 Structure of a hetero-core optical sensor [31].

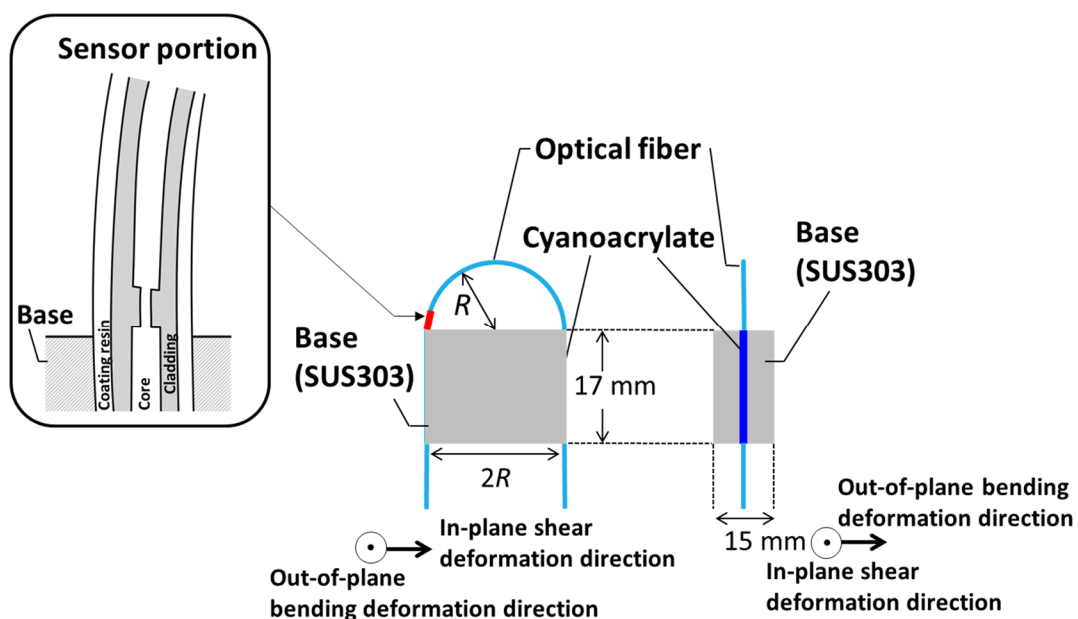


Fig. 3.2 Configuration of a semicircular hetero-core optical fiber accelerometer with fixed supports at both ends [31].

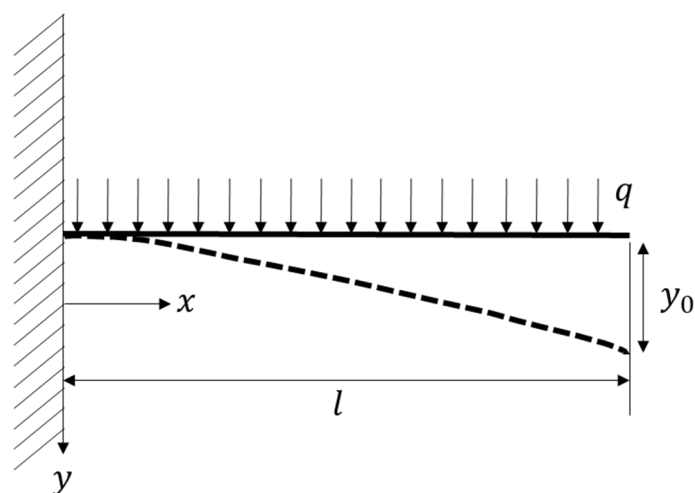
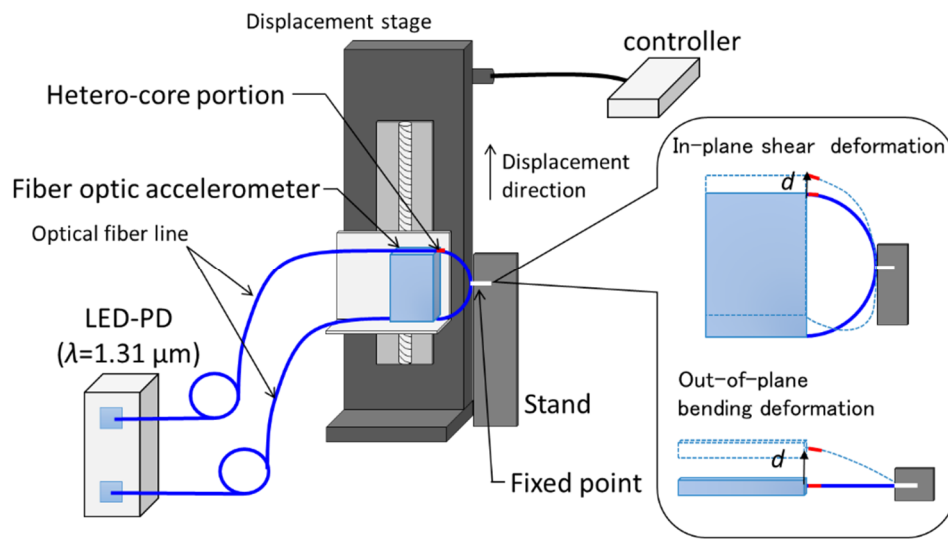


Fig. 3.3 Cantilever models subjected to uniformly distributed loads.

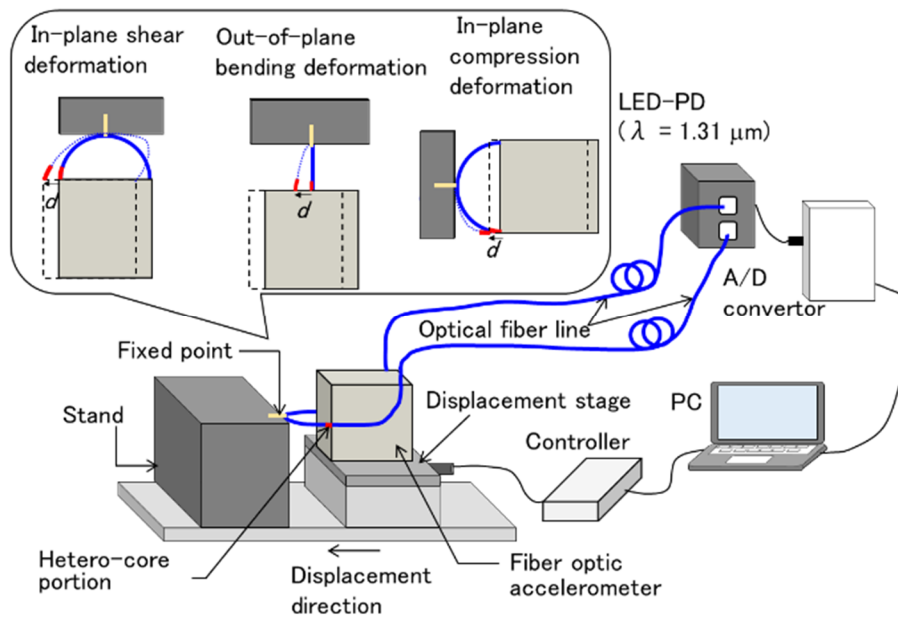
3.3 強制変位特性

3.3.1 実験構成

作製した両端固定支持梁構造へテロコア光ファイバ加速度計の、面内せん断変形方向、面外曲げ変形方向、面内圧縮変形方向におけるたわみによる光損失特性を明らかにするため、強制変位特性実験を行った。Fig. 3.4 に強制変位実験のための実験構成を示す。本提案加速度計の半円状の梁に強制変位を与えるために、それぞれの拡大図に示すように、半円ファイバ梁の中心をスタンドに固定した。スタンドは制御変位ステージ上に取り付け、半円状の光ファイバの中心を一方向に引っ張った。この強制変位は、PC からステージコントローラを介して加速度計の固定台が設置された制御変位ステージに印加された。制御ステージは縦方向ステージ(SGSP26-100, SIGMAKOKI CO.,LTD.)または横方向ステージ(HPS60-20X, SIGMAKOKI CO.,LTD.)を用いた。光損失の計測にはコストパフォーマンスの高い計測器である、光源に波長 $1.31 \mu\text{m}$ の LED と受光部に PD を用いた光強度計測器(Core System Japan Co., Ltd., iLineBox4C) を用いた[31]。



(a)



(b)

Fig. 3.4 Experimental setup of the uniaxial semicircular hetero-core optical fiber accelerometer for evaluating forced displacement characteristics with (a) vertical and (b) horizontal stage [31]–[32].

3.3.2 実験結果

Fig. 3.5 に曲率半径 R が 15 mm の提案光ファイバ加速度計の半円ファイバ梁の中央部における変位量に対する光損失特性を示す。グラフは 5 回繰り返し計測した平均値を示しており、その特性から得られた感度、最大標準偏差、変位量 $-0.1-0.1$ mm の範囲におけるフルスケール誤差(%FS)を Table 3.1 に示す。全ての变形方向において、変位に対して高い線形性を有しており、変位量が増加していくと、面内せん断变形方向および面外曲げ变形方向においては光損失が増加し、面内圧縮变形方向においては光損失が減少する傾向にあった。3 方向の变形方向に対して最も高い感度を有していたのは面内せん断变形であり、面外曲げ变形と面内圧縮变形方向には感度差が生じていることが明らかになったため、面内せん断变形方向を主軸とする。また、面内せん断变形方向および面内圧縮变形方向と比較し、面外曲げ变形方向においては感度が 1桁ほどの大きな感度差が生じていた。これは、面内方向においては、ヘテロコア部における初期曲率が生じているのに対し、面外曲げ变形方向の軸に対しては初期曲率がほぼ生じていないことが要因であると考えられる。先述したように、ヘテロコア部における曲率が小さい場合、ヘテロコア光ファイバセンサは感度が低い一方で、ある程度の曲率が生じている場合には高い感度が得られる。本実験の結果から、ある 1 方向に初期曲率を与えた場合、曲率が生じている軸に対しては高い感度を有しており、曲率がほぼ生じていない軸に対しては感度が生じないことが明らかになった。このように、提案光ファイバ加速度計は方向によって感度に大きな差が生じ、軸間感度の低下に寄与していることが確認された。また、Fig. 3.6 に曲率半径 R が 7 mm の提案光ファイバ加速度計における面内せん断变形方向と面外曲げ变形方向における半円ファイバ梁の中央部の変位量に対する光損失特性を示す。面内せん断变形方向と面外曲げ变形方向における感度はそれぞれ 2.05×10^1 , 4.01×10^{-1} dB/mm であった。曲率半径が異なるセンサにおいても、軸間感度差が生じていることが確認された[31][32]。振動が印加されたことによって生じる光ファイバの半円のたわみ量は比例の関係があるため、本実験で得られた特性から、提案光ファイバ加速度計は加速度に対して線形な光損失が生じることが期待される。Fig. 3.5 (b)は変位量 $-0.01-0.01$ mm における光損失特性であり、全ての变形方向において往路と復路にヒステリシスが生じていることが確認された。これは、制御ステージにおけるモーターのバックラッシュによるものだと考えられる。そのため、正確に計測するには参照用にレーザー変位計を用いて計測をする必要がある。

Fig. 3.7 に、曲率半径 R が 15, 10, 7 mm の加速度計の面内せん断变形方向における強制変位に対する光損失応答の 5 回繰り返し実験を行った平均値の結果を示す。各加速度計における感度、最大標準偏差、変位量 $0-0.1$ mm の範囲における%FSを Table 3.2 に示す。各加速度計において、変位量が増加していくと光損失が増加する傾向があり、高い線形性を有していることが確認された。また、曲率半径が小さくなると変位量に対して感度が高くなっており、これは提案加速度計の半円の中央部の変位に対する固定端付近の変位量が違うため、曲率半径が小さいほど曲率が増加しているためだと考えられる。

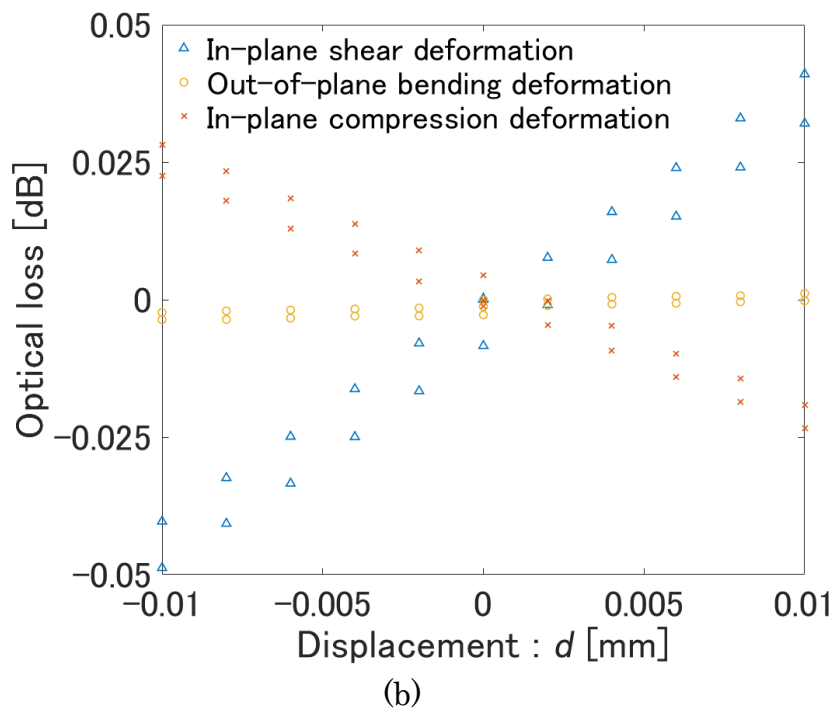
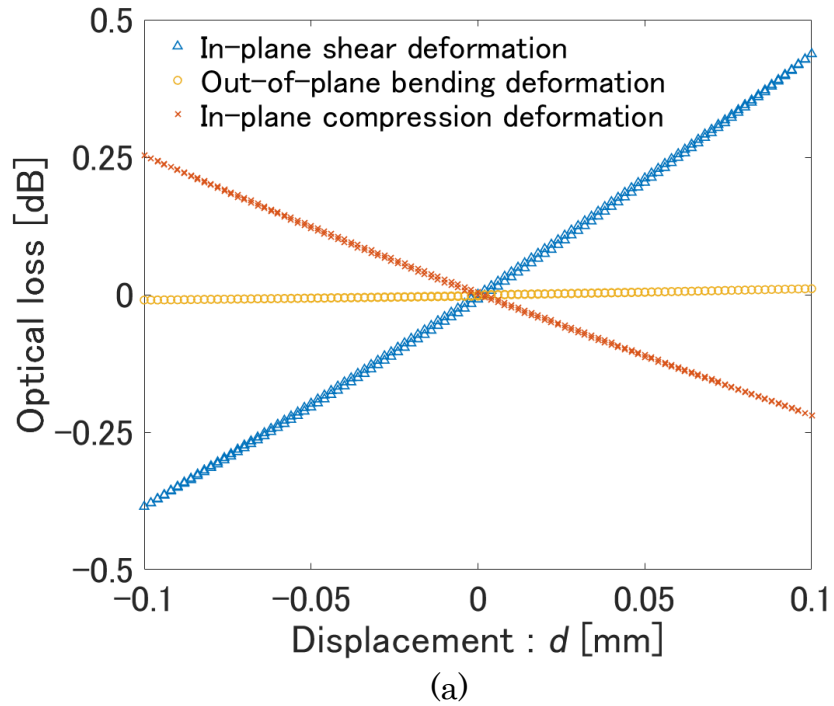


Fig. 3.5 Optical loss responses of the uniaxial semicircular hetero-core optical fiber accelerometer subjected to forced displacement in three directions: (a) -0.1 to 0.1 mm range of optical loss variation, and (b) -0.01 to 0.01 mm range of optical loss variation [32].

Table 3.1 Sensitivity and full-scale error in forced displacement.

	Sensitivity [dB/mm]	Standard deviation [dB]	Standard deviation [%FS]	R2 value (coefficient of determination)
In-plane shear deformation	4.4087	0.001995	0.44718	0.9984
Out-of- plane bending deformation	0.1071	0.001704	8.24455	0.9834
In-plane compression deformation	-2.3542	0.001488	0.314365	0.9986

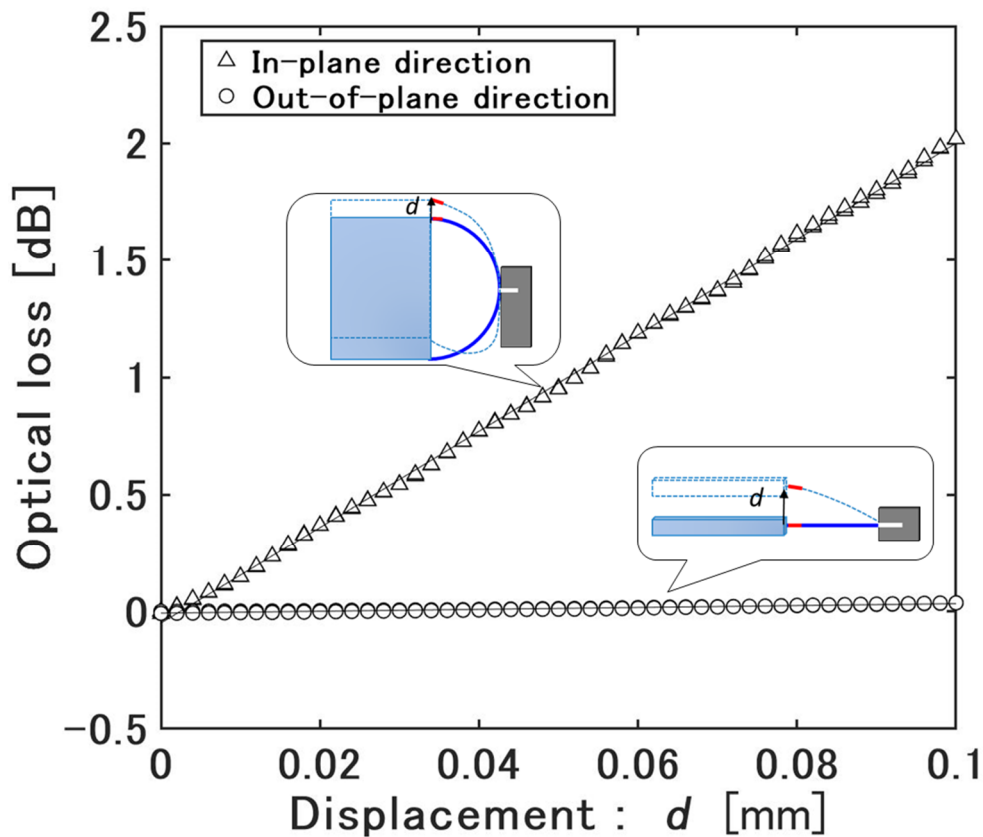


Fig. 3.6 Optical loss responses of the hetero-core optical fiber accelerometer with a curvature radius of 7 mm for the positive displacement direction [31].

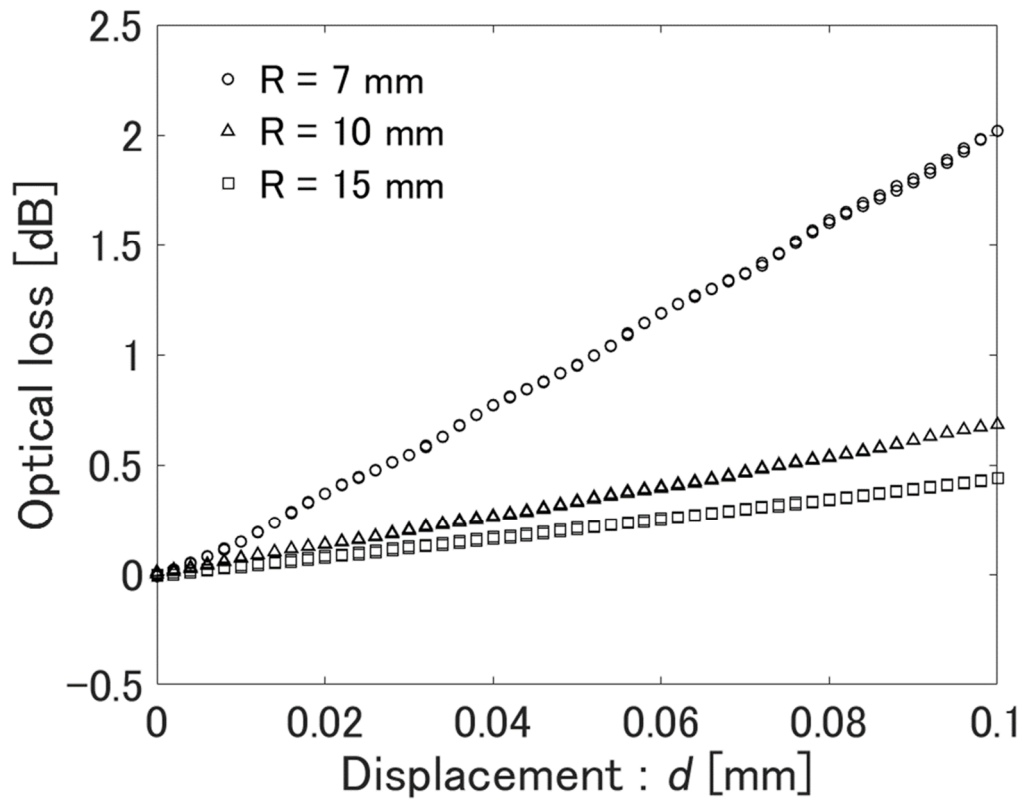


Fig. 3.7 Optical loss response of the proposed accelerometers with different radii of curvature to forced displacement in the direction of the in-plane shear deformation.

Table 3.2 Sensitivity and full-scale error of the proposed accelerometers with different radii of curvature.

	Sensitivity [dB/mm]	Standard deviation [dB]	Standard deviation [%FS]	R2 value (coefficient of determination)
R7	20.502	0.023863	1.176214	0.9994
R10	6.727	0.00445	0.65221	0.9988
R15	4.4087	0.001995	0.44718	0.9988

3.4 周波数および加速度振幅応答特性

本提案加速度計に機械的な振動を与えた際の特性を明らかにするために、周波数および加速度振幅応答実験を行った。

3.4.1 実験構成

Fig. 3.8 に周波数および加速度振幅のための実験構成を示す。この機械振動を印加する実験構成では、振動による慣性力がファイバ梁にかかり、強制変位特性での実験構成のように半円の中心を固定しなくても変位が生じるため、センサの固定点は設けていない。本提案加速度計を加振器 (WaveMaker01, Asahi Seisakusyo) に取り付け、また、本提案加速度計のすぐ近くに市販の加速度計 (356A16, PCB Piezotronics, Inc.) を参照用として設置し、基準加速度を測定した。提案光ファイバ加速度計と参照用加速度計から出力されるアナログ電圧は、データ収集 (DAQ) である NI USB-6211 を用いて AD 変換を行い、PC で信号を取得する。また、加振器に印加される信号は PC によって制御し、DAQ からアナログ出力される。測定の際のサンプリング周波数は、提案センサ、参照用センサともに 10 kHz とした。また、本提案加速度計は、強制変位特性実験と同様に、光源に波長 $1.31 \mu\text{m}$ の LED と受光部に PD を用いた光強度計測器 (Core System Japan Company, Ltd., iLineBox4C) を用いて測定した。提案加速度計の性能は、各周波数で得られた時間応答波形から高速フーリエ変換 (FFT: fast Fourier transform) を行い、印加周波数の $\pm 10\%$ の帯域幅を持つバンドパスフィルタを用いて、スペクトルピークを抽出し、参照用加速度計に対する提案加速度計の 1 g あたりの光損失値を算出し評価した [31]–[32]。

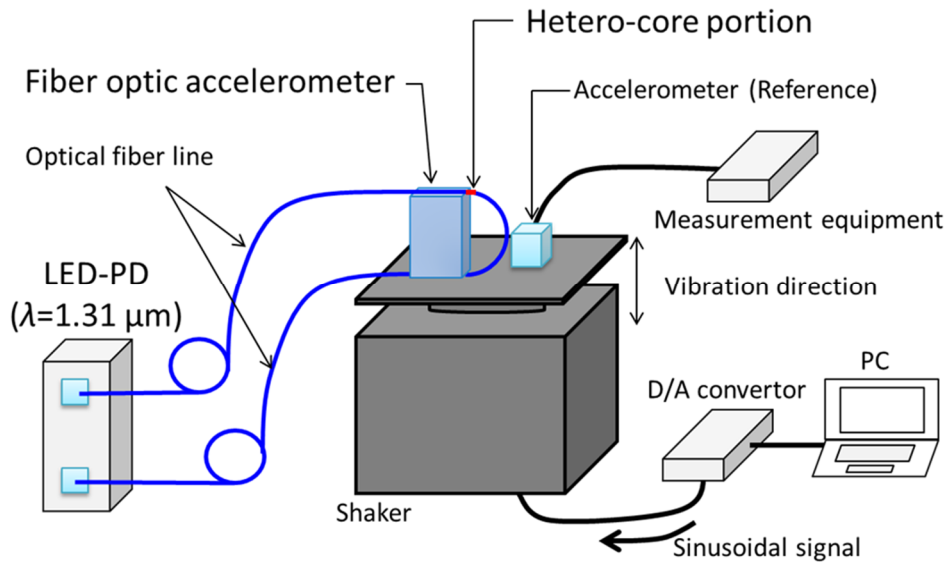


Fig. 3.8 Experimental setup of the hetero-core fiber optic accelerometer for evaluating mechanical vibration [31].

3.4.2 有限要素 (FE: Finite Element) 解析

本研究で使用した有限要素シミュレーションソフトは COMSOL Multiphysics であり,サイエンス,工学,製造過程といった分野の研究で用いられる汎用シミュレーションソフトウェアである. COMSOL Multiphysics では構造力学,音響,電磁気,流体流れ,電熱,化学工学に特化したモジュールが提供されている[59]. 本研究では,作製したセンサのモード形状や共振周波数を確認するために構造力学モジュールを用いて FE 解析を行った. 構造解析を行う際には,ヤング率,ポアソン比,密度といった物性値が必要である. 光ファイバのモデルは,直径 $125\ \mu\text{m}$ のガラスの周りに厚さ $65\ \mu\text{m}$ の紫外線硬化樹脂の被覆で覆われている構成で作成した. 光ファイバのシリカガラスに関する物性値は明らかになっている. 光ファイバの被覆は,プライマリ層とセカンダリ層の 2 層からできており,それぞれのヤング率はプライマリ層が $1\ \text{MPa}$ かそれ以下,セカンダリ層が $500\ \text{MPa}$ 以上である[58]. しかし,被覆材料の正確な物性値は明らかではないため,このヤング率と,過去の研究成果[28][30]を参考にし,先述した周波数応答特性の実験結果と整合性がとれるように次の二つのパターンで物性値を設定した. 一つ目に設定した物性値を Table 3.3 に示す. これは,先述したプライマリ層のヤング率と文献[28]を参考し,被覆のヤング率と密度を決定した. 二つ目に設定した物性値を Table 3.4 に示す. これは,セカンダリ層のヤング率と文献[30]を参考にしてパラメータを設定したものである. Fig. 3.9 に R15 の条件における提案光ファイバ加速度計の作成したモデルを示す. FE 解析による周波数応答特性では,片側の固定端から $1\ \text{mm}$ の位置での変位量をシミュレーション結果から得た.

Table 3.4 の物性値を用いた FE 解析で得られた固有周波数の値を Table 3.5 に, R7, R10, R15 のモード形状を Fig. 3.10, Fig. 3.11, Fig. 3.12 に示す. モード形状のシミュレーション結果から,どの曲率半径の条件においても 1 次モードでは面外曲げ変形方向, 2 次モードでは面内せん断変形方向, 3 次モードでは面外曲げ変形方向, 4 次モードでは面内圧縮変形方向に由来するモードであることが明らかになった. 各変形方向に振動を印加した際に,周波数応答特性においてはこれらのモードが固有周波数として現れると考えられる. また,曲率半径を小さくしていくと,固有周波数が高くなっていくことがシミュレーション結果から確認された. 固有周波数 ω はバネ定数 k と質量 m を用いて $\sqrt{\frac{k}{m}}$ と表すことができる. そのため,曲率半径を小さくしていくことで固有周波数が高くなったのはファイバ全体の質量の減少したことが要因である.

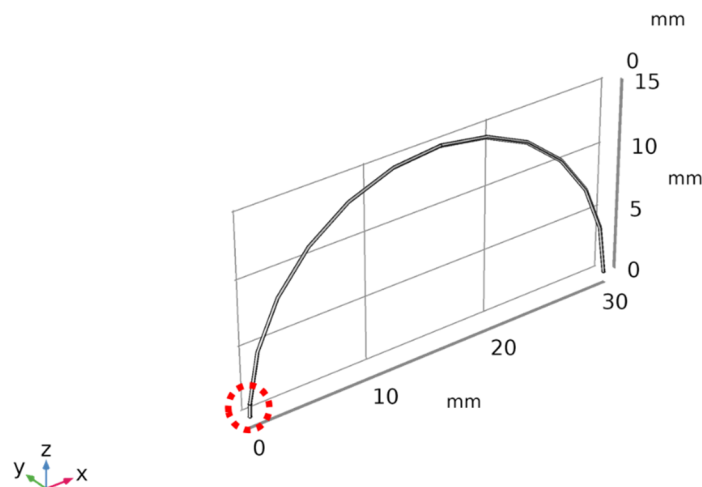


Fig. 3.9 Fiber beam model for FE analysis.

Table 3.3 Material parameters for the first condition used in the FE analysis.

Material name	Density [kg/m ³]	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio
Silica glass	2.201×10^3	6.92×10^4	0.17
UV curable resin	7.45×10^2	0.5	0.3

Table 3.4 Material parameters for the second condition used in the FE analysis.

Material name	Density [kg/m ³]	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio
Silica glass	2.201×10^3	6.92×10^4	0.17
UV curable resin	1.023×10^3	2.5×10^2	0.3

Table 3.5 FE analysis results of the natural frequency from 1st to 5th modes.

Radius of curvature [mm]	1st [Hz]	2nd [Hz]	3rd [Hz]	4th [Hz]	5th [Hz]
7	683	1637	1975	3603	4139
10	338	811	976	1785	2046
15	154	369	443	814	927

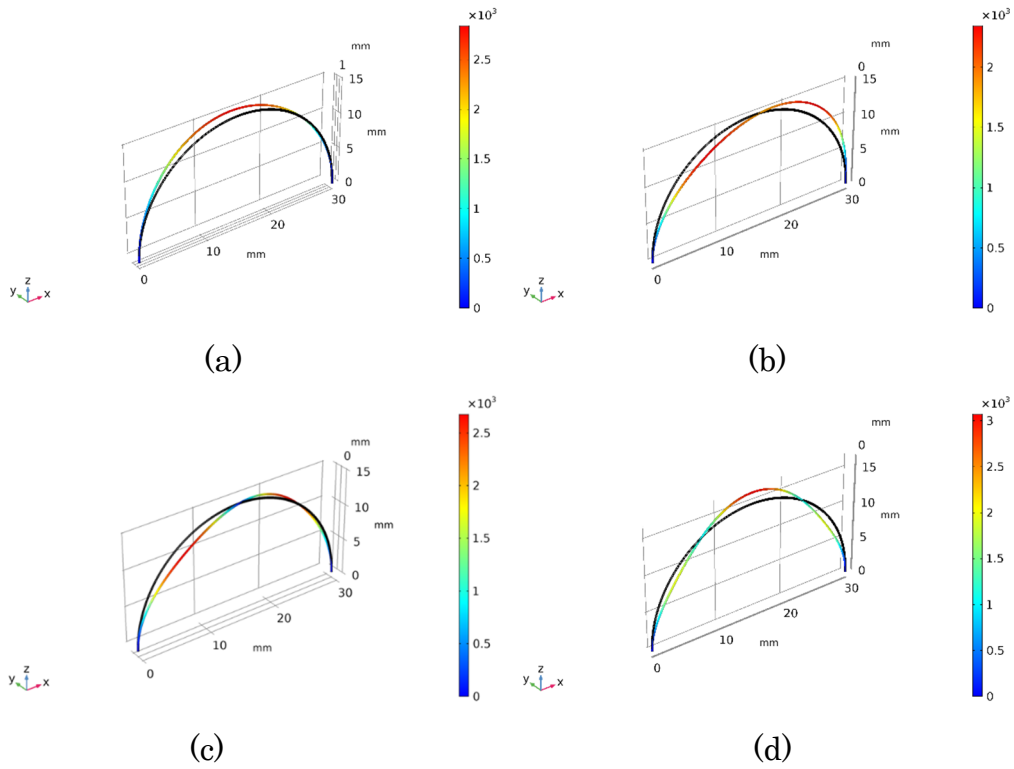


Fig. 3.10 Natural vibration analysis results of the R15 accelerometer by FE analysis; (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd and (d) 4th modes shapes.

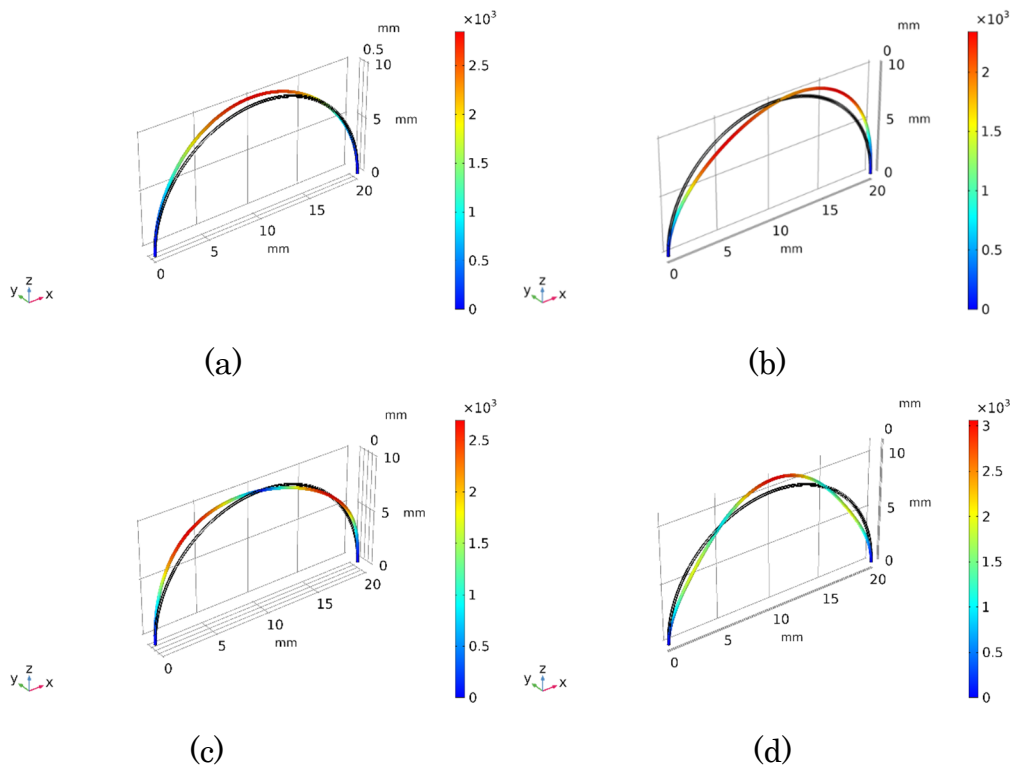


Fig. 3.11 Natural vibration analysis results of the R10 accelerometer by FE analysis; (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd and (d) 4th modes shapes.

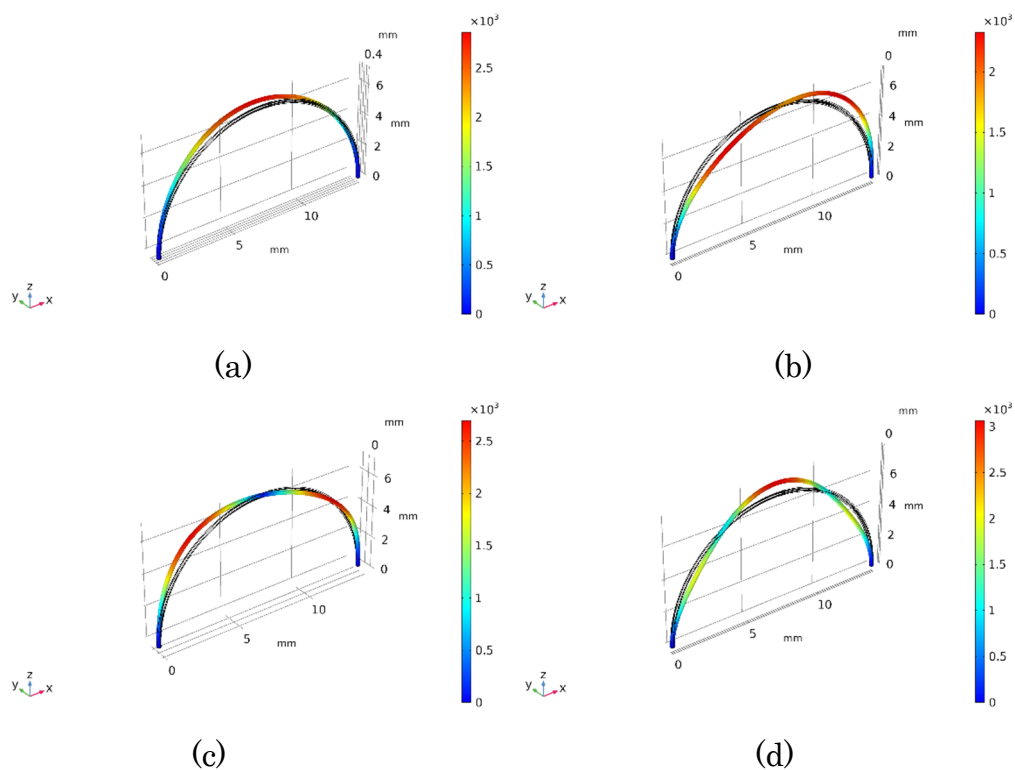


Fig. 3.12 Natural vibration analysis results of the R7 accelerometer by FE analysis;
 (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd and (d) 4th modes shapes.

3.4.3 周波数応答特性

周波数応答特性では、正弦波の機械振動を周波数範囲 10–3000 Hz, 10 Hz 刻みで周波数を掃引し印加した。得られた周波数応答特性から、共振周波数および加速度計として計測可能な周波数範囲を評価した。

Fig. 3.13 に曲率半径 R15, R10, R7 の面内せん断変形方向における実験と FE 解析のパラメータ条件の 1 つめにおけるシミュレーションから得られた周波数応答特性を示す。実験から得られた値は 1 g あたりにおける光損失量であるが、シミュレーションと比較し評価するため、強制変位特性を用いて実験的に得られた光損失量から変位量を算出した。また、強制変位で示されている変位量は半円のファイバ梁の中心の変位量であるため、シミュレーションを用いて光ファイバ加速度計の固定端から 1 mm 離れた位置での変位量、つまりヘテロコア部における変位量に変換している。FE による解析と実験結果の比較により、共振周波数の位置に関して良好な一致が見られた。さらに、共振周波数以下の周波数帯域において、感度の安定性が確認された。光ファイバの曲率半径が 7, 10, 15 mm において、FE 解析から得られた面内せん断変形方向における提案光ファイバ加速度計の第一共振周波数は 1580, 780, 360 Hz であった。周波数応答特性実験から得られた対応する値は、それぞれ 1810, 860, 350 Hz であった。以上の結果から、光ファイバの曲率半径が小さくなると、実験から得られた共振振動数は FE 解析から得られた共振振動数よりも高くなることがわかった。FE 解析では、光ファイバ

の外被覆は、ヤング率、密度特性が一様であると仮定していた。これに対し、実験に用いた光ファイバは融着接続で作製した後、再コーティングを施しているため、実験で得られた共振振動数は外被膜が一様でないことの影響を受けていると考えられる。しかし、実験から得られた感度は、FE 解析から得られた感度とよく一致している。そのため、共振振動数に影響を与えるヤング率や密度は FE 解析で厳密なモデル化はできなかったが、製作したヘテロコアファイバ加速度計は FE 解析モデルに基づいている。FE 解析から得られた感度は、曲率半径 7, 10, 15 mm でそれぞれ 8.76×10^{-6} , 1.77×10^{-5} , 3.94×10^{-5} mm/g であった。提案加速度計の曲率半径 7, 10, 15 mm において、得られた感度は共振周波数の約 4 分の 1 以下の 450, 210, 80 Hz の範囲での平均感度は、それぞれ 8.95×10^{-6} , 1.76×10^{-5} , 3.90×10^{-5} mm/g であり、標準偏差が 3.88, 1.83, 5.39% と明らかに安定していることが確認された。以上の結果より、感度が安定している第一共振振動数の 4 分の 1 の周波数帯域で振動の測定が可能である。また、感度が安定する帯域で測定可能な周波数範囲は、光ファイバの曲率半径を変えることで調整可能である。従って、曲率半径を調整することで、計測対象の共振周波数に応じた構造物モニタリングを行うことができる[31]。また、Fig. 3.14 に二つ目に設定したパラメータ条件下における FE 解析の周波数応答特性を示す。曲率半径 R が 7, 10, 15 mm において、第一共振振動数はそれぞれ、1638, 810, 370 Hz であった。また、これらの曲率半径に対応する感度は 8.75×10^{-6} , 1.75×10^{-5} , 3.97×10^{-5} mm/g であり、共振周波数、感度ともに良好な一致が見られた。

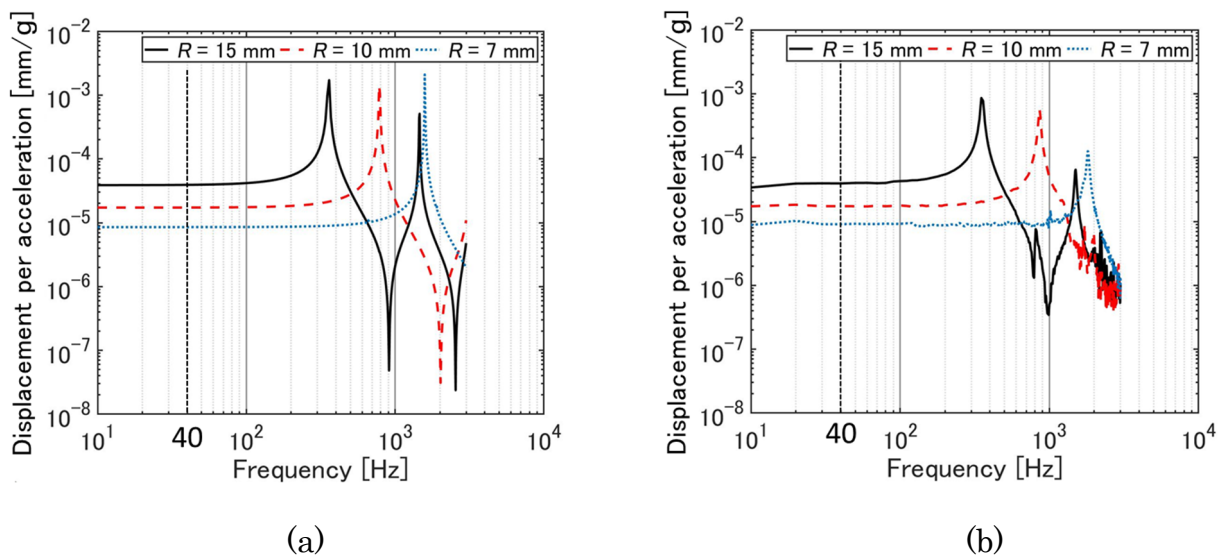


Fig. 3.13 Frequency response characteristics of the displacement for different fiber curvature radii of the hetero-core optical fiber accelerometer subjected to in-plane vibration: (a) FE analysis and (b) experimental results [31].

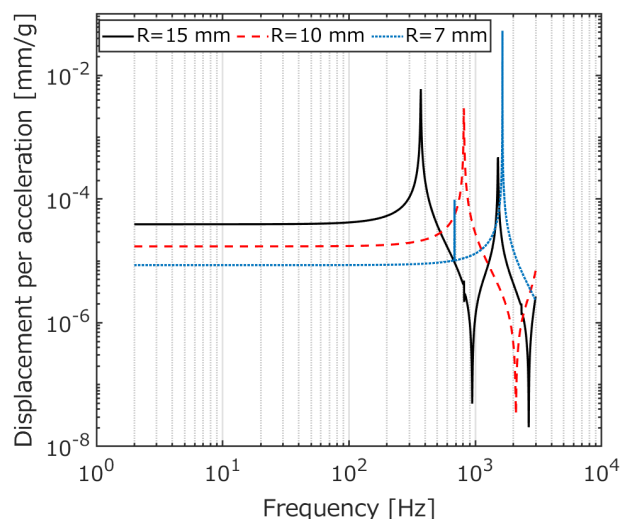


Fig. 3.14 Frequency response characteristics of the displacement for different fiber curvature radii of the hetero-core optical fiber accelerometer subjected to in-plane vibration FE analysis under the second parameter condition.

Fig. 3.15 に曲率半径 7, 10, 15 mm における面内せん断変形方向と面外曲げ変形方向における周波数応答特性の結果を示す。前述したように、面内せん断方向における振動においては FE 解析のモデルから計算された周波数特性から得られた共振振動数との間に良好な一致が見られる。面外曲げ変形方向の振動における周波数特性は、面内せん断変形方向の振動における第一共振周波数と面外曲げ変形方向における共振周波数、および次数モードと考えられる複数のピークが見られる。Fig. 3.15 に示すように、面内せん断変形方向を主軸とした時の横感度、つまり面外曲げ変形方向は、第一共振振動数以下では主軸感度に比べて十分に低いことが確認された。強制変位特性で示されたように、面外曲げ変形方向の変位に対する感度が面内せん断方向よりもはるかに低いため、ヘテロコア光ファイバの曲率に応じて曲げ剛性や初期光損失が増加するため、S/N 比が低下していることが分かる。光ファイバの曲率半径が 7, 10, 15 mm の場合、630, 210, 80 Hz 以下の周波数領域で、計算上の横感度はそれぞれ 12.2%, 15.9%, 4.27%であった。先行研究において、ヘテロコア部が自由支持点なしで両端固定端間の中央に位置する半円状に曲がった光ファイバ加速度計の曲率半径 15 mm に対する横感度は 11%であった[29]。一方、提案する光ファイバ加速度計はヘテロコア部を半円のファイバの片方の固定端に配置したことで横感度を改善することに成功した。曲率半径 7 mm の加速度計の強制変位特性における横感度に相当する面内せん断変形方向および面外曲げ変形方向の変位に対する光損失の比率は 1.9%であり、強制変位における横感度は、40 Hz の振動を与えた場合よりも低かった。これは、曲率半径 15 mm の時の FE 解析の結果を見ると、半円状の光ファイバ梁構造の加速度に対する変位は、面内せん断方向よりも面外曲げ変形方向が大きいためである(Fig. 3.16)。動的変位では、面内せん断変形方向の変位が面外曲げ変形方向の変位よりも小さいため、加速度に対する横感度が強制変位よりも高いと考えられる。光ファイバの曲率半径が 15 mm の場合、加速度に対する横感度が低く、曲率半径の小さい加速度計の方が横感度が高かった。しかし、光ファイバの曲率半径 15 mm の加速度計は、他の光ファイバ曲率半径のものよりも第一共振振動数が低

いため、測定周波数帯域が狭い。このように、提案する光ファイバ加速度計は、感度だけでなく、横感度においても、測定周波数帯域とトレードオフの関係にあることが確認された[31]。

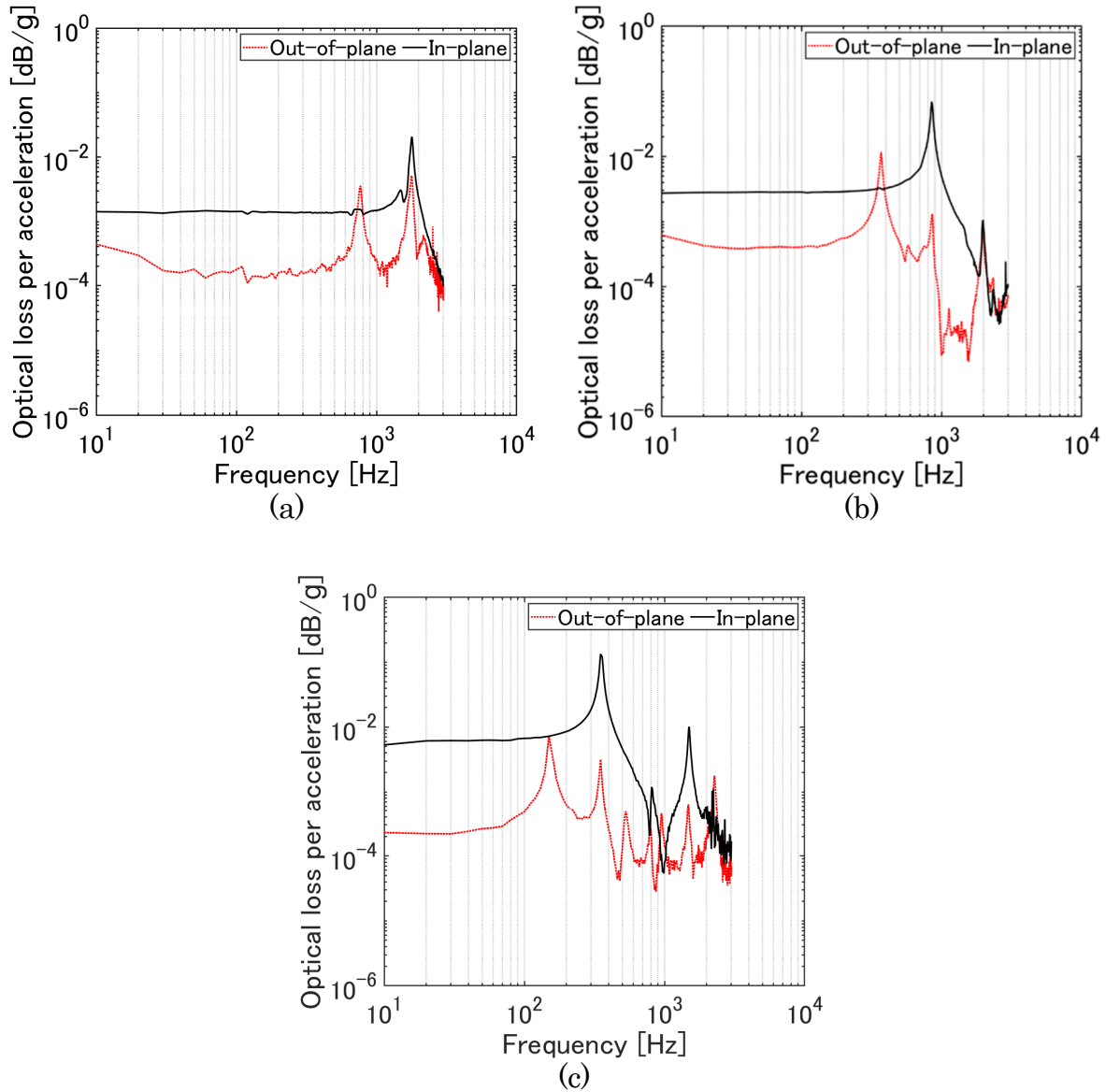


Fig. 3.15 Frequency response characteristics for the prime-axis (in-plane direction) and cross-axis (out-of-plane direction) vibrations of the proposed hetero-core fiber optic accelerometer for fiber curvature radii, R , of (a) 7 mm, (b) 10 mm, and (c) 15 mm [31].

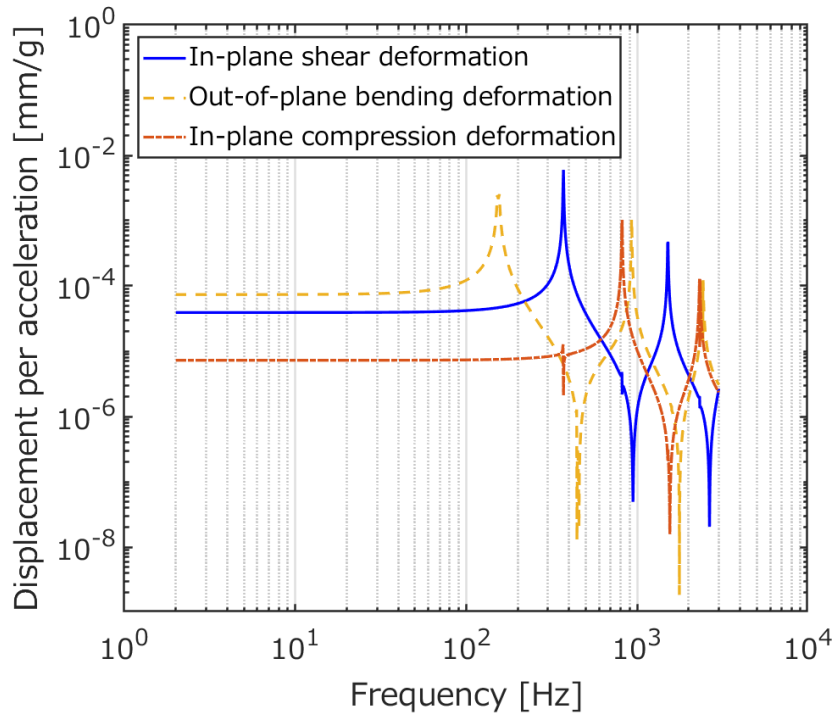


Fig. 3.16 Frequency response characteristics results of FE analysis when acceleration is applied in three directions.

3.4.4 加速度振幅応答特性

加速度振幅応答特性では、印加周波数を 40 Hz に固定して周波数応答特性同様、正弦波の機械振動を印加した。また、DAQ からアナログ出力され加振器に印加される電圧を PC によって制御し増加させることによって、加速度振幅を増加させ実験を行った。

Fig. 3.17 に、40 Hz の正弦波振動を印加した際の振幅応答特性である加速度振幅に対する光損失変化を示し、40 Hz における光損失変化量で感度を評価した。提案するヘテロコア光ファイバ加速度計の感度は、周波数応答特性で示されたように、第一共振振動数の 4 分の 1 以下の周波数帯域で安定していることが分かっているため、この帯域においては 40 Hz での振幅応答特性と同様の傾向がみられると考えられる。曲率半径 7, 10, 15 mm のヘテロコア光ファイバ加速度計に最大加速度 9 g を印加し、加速度が 0 の時を 0 dB とした。Fig. 3.17 に示すように、上記の光ファイバ曲率半径に対する提案光ファイバ加速度計の感度は、それぞれ 1.45×10^{-3} , 2.80×10^{-3} , 6.16×10^{-3} dB/g であった。すべての光ファイバ曲率半径において、加速度に対する光損失は単調増加しており、高い線形性を示した。これは、光損失を効率よく加速度に変換できることを示している。また、測定分解能が 0.001 dB であった場合、その条件下では曲率半径 15 mm においては測定可能な最小加速度は 0.16 g である。

Fig. 3.18 に加速度 5.7 g の 40 Hz の正弦波振動を、提案光ファイバ加速度計の面内せん断変

形方向に印加した際の振動に対する、提案光ファイバ加速度計の時間応答と加速度スペクトル、参照用加速度計の時間応答と加速度スペクトルを示す。赤の実線は提案光ファイバ加速度計から得られた光損失を振幅応答特性を用いて換算した加速度、黒の点線は参照用加速度計から得られる加速度を示している。提案光ファイバ加速度計から得られた応答と、参照用加速度計から得られた応答との間に良好な一致が見られた。しかし、光ファイバ加速度計の曲率半径が小さくなるにつれて、提案光ファイバ加速度計から得られる正弦波波形の歪みが参照用加速度計から得られる波形に比べて、大きくなっていることが確認された。これは、初期曲率半径が小さいため、ヘテロコア光ファイバの初期光損失が増加し、提案光ファイバ加速度計の S/N 比が低下したためだと考えられる[31]。

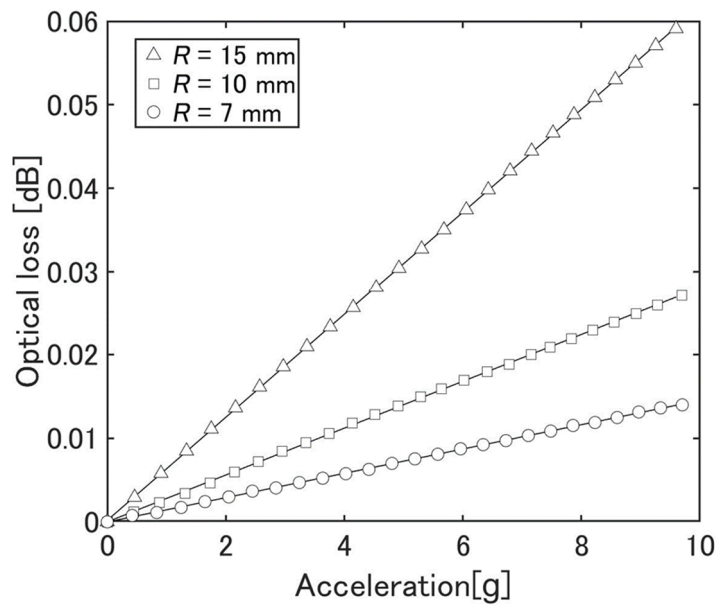


Fig. 3.17 Amplitude response characteristics of the hetero-core optical fiber accelerometer with a mechanical vibration of 40 Hz in in-plane vibration [31].

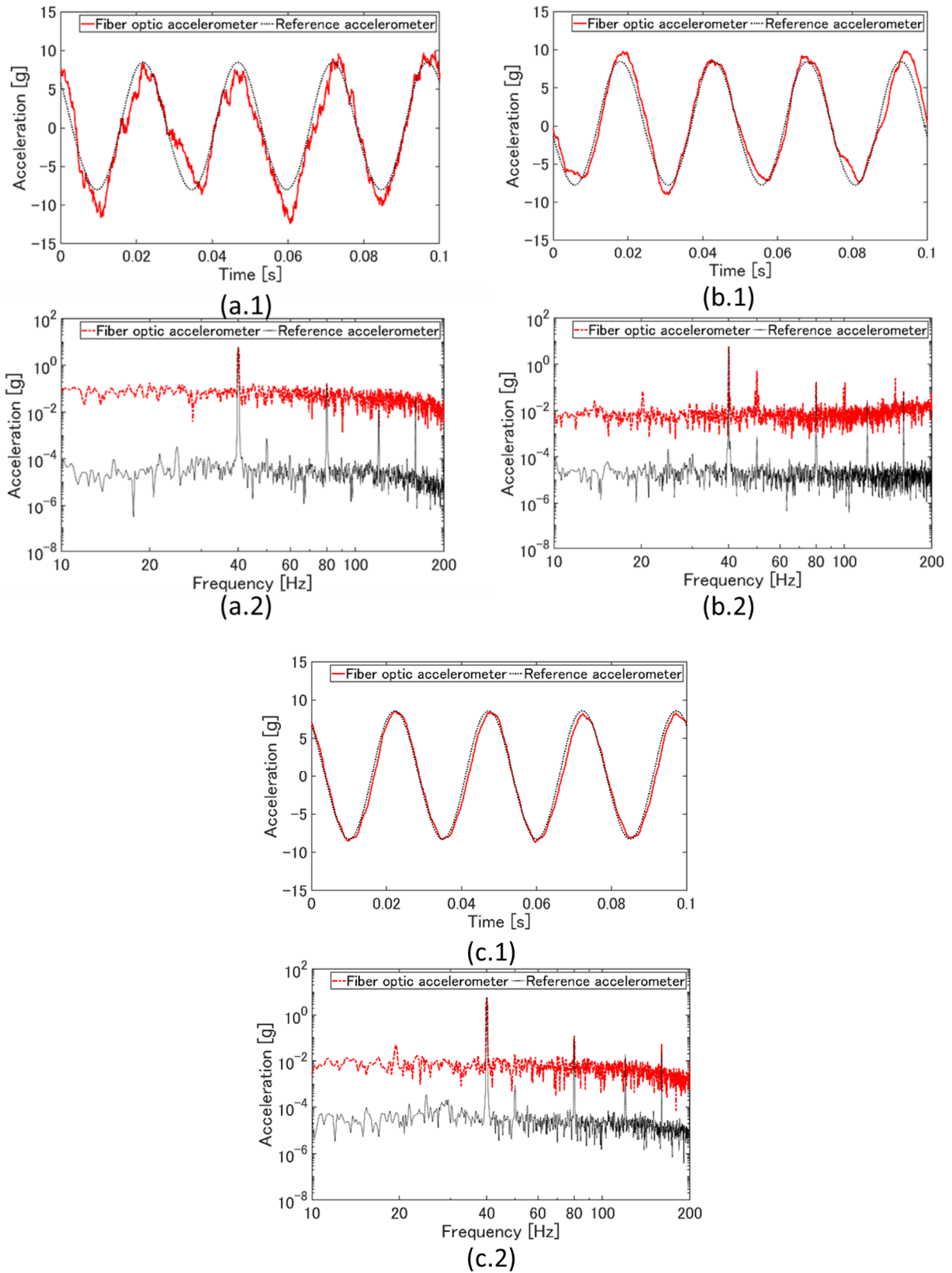


Fig. 3.18 Time responses of the proposed and reference accelerometer for a mechanical vibration in the in-plane direction at 40 Hz for fiber curvature radii, R , of (a) 7 mm, (b) 10 mm, and (c) 15 mm; (a.1–c.1): real-time responses and (a.2–c.2): spectra for acceleration [31].

3.5 3軸加速度計

3.5.1 3×3 感度マトリクス算出のための周波数および加速度振幅特性

これまでの強制変位や周波数および加速度振幅応答特性で、面内せん断変形方向の変位、振動に対して主軸感度を有しており、面外曲げ変形方向、面内圧縮変形方向においては主軸感度よりも感度が低く、感度差が生じていることが確認され、1軸加速度計としての性能が明らかになった。そこで、3本のヘテロコア光ファイバ1軸加速度計を用いることによって3軸加速度計に拡張することを提案する。Fig. 3.19に提案するヘテロコア光ファイバ3軸加速度計の構成を示す。提案光ファイバ3軸加速度計の曲率半径 R は 15 mm とした。3軸加速度計として機能させるために、1軸光ファイバ加速度計の半円が直交するように3本のセンサを立方体のアルミニウム合金の固定台に設置した。

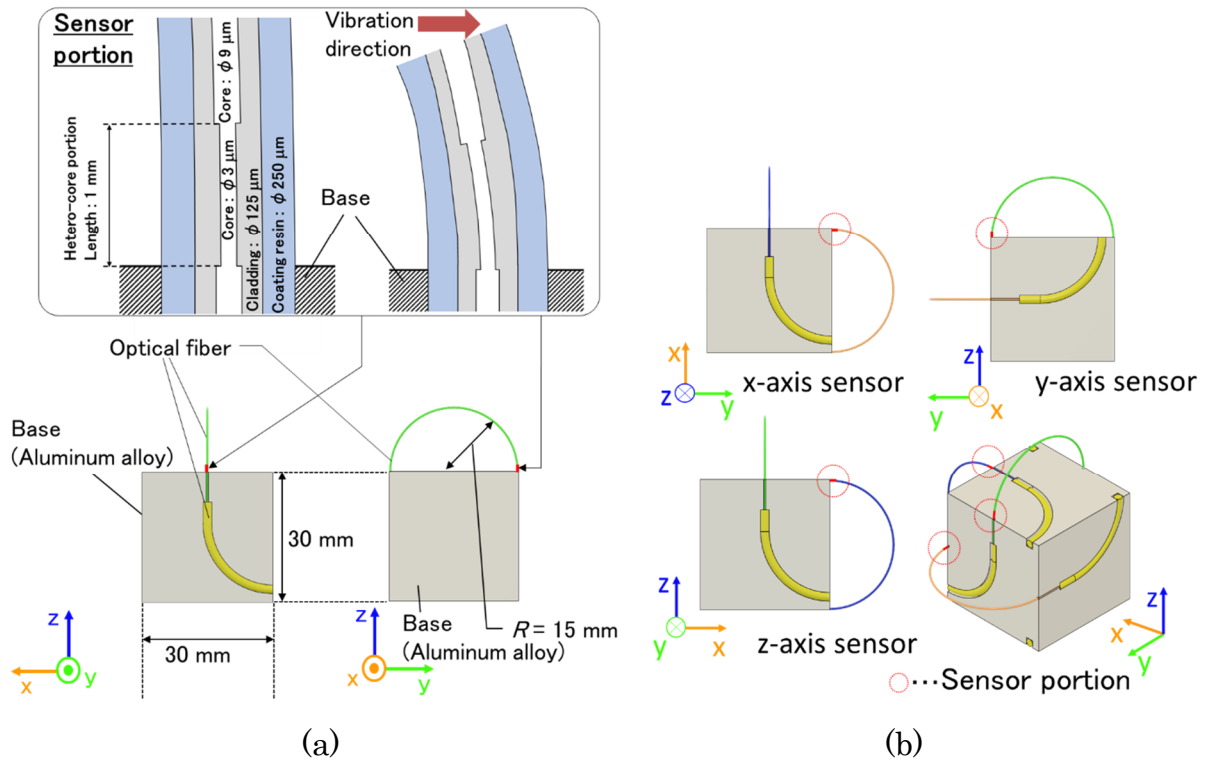


Fig. 3.19 Configuration of a semicircular hetero-core optical fiber (a) uniaxial and (b) triaxial accelerometer [32].

一般的に3軸加速度計においては、各軸の加速度はそれぞれのセンサに対して主軸感度で換算をするか、横感度が考慮された3×3感度マトリクスを用いて算出される[61]–[63]。主軸感度で換算した場合、横感度の影響により換算後の加速度値に偏差が生じる。それに対し、3×3の感度マトリクスを用いた換算では、横感度の影響を補正することができる。センサ出力 O_x , O_y , O_z とセンサに加わる加速度 a_x , a_y , a_z の関係は3×3感度マトリクスである校正行列 A を用いて次のように表される。

$$\begin{pmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}, \text{with } A = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

センサの感度は, $\mathbf{S} = S_{ij}(i, j = x, y, z)$ を用いて表される. 第一添え字はセンサの出力軸, 第二添え字は加速度の印加方向を示している.

このセンサ感度を算出するために, 作製した提案 3 軸光ファイバ加速度計の周波数応答特性と加速度振幅応答特性を Fig. 3.20 で示した実験構成を用いて取得した. Fig. 3.21 に取得した提案 3 軸光ファイバ加速度計の周波数応答特性を示す. これらの結果の青線, オレンジ線, 黄線, はそれぞれ, 面内せん断変形方向, 面内圧縮変形方向, 面外曲げ変形方向の応答を示している. 主軸感度(面内せん断変形)方向においては 370–380 Hz, 横感度(面内圧縮変形, 面外曲げ変形)方向においては 140–170 Hz に第一共振周波数を有しており, 90 Hz 以下においては感度が安定する周波数帯域であることが確認された. 90 Hz 以下において, 面内せん断変形方向に対する面内圧縮変形方向または面外曲げ変形方向の横感度が 4.90%–50.4%であった. さらに, y 軸センサにおける面内圧縮変形方向である横感度 S_{yz} は, 面外曲げ変形方向である横感度 S_{yx} よりも感度が低かった. しかし, 強制変位特性では, 面外曲げ変形方向に対する光損失の感度が面内圧縮変形方向に対する感度と比べて低いことが示されている. 1 軸加速度計はキューブのベースの側面に直交するように設置されているが, 各センサの位置が作製時に若干の非対称性が生じたことが横感度の偏差の原因であると考えられる. Fig. 3.21 に示すように, 3 つの半円状の光ファイバ加速度計では, 横方向成分の周波数特性が顕著に異なり, 主方向の感度も若干異なっていた. これは, 光ファイバを固定するために加工したアルミニウム合金の固定台の溝の機械的精度が, ステンレスの固定台のものより低かったためである. 溝の機械的精度による既存のずれを推定するために固定点の位置を理想的な位置から 1 mm ずらした時, 感度がどの程度変化するかを評価した. その結果, 面外曲げ変形方向に対する感度は, 定点位置と比較し 1.6×10^{-4} dB/g 増加することが分かった. しかし, この固定点の移動における推定では, x 軸センサの 0.228×10^{-3} dB/g と z 軸センサの 2.78×10^{-3} dB/g の横方向の感度差を示すことは困難であった. 従って, 固定点の位置ずれによるヘテロコア部の初期曲率半径の変化が横感度にも影響を与えている可能性がある. これらの偏差は, あらかじめ作製された加速度計の周波数特性から 3×3 の感度マトリクスを用いることで補正されると考えられる. 得られた周波数特性から, 10–90 Hz の周波数範囲での感度の平均値を用いた感度マトリクス A は次のように表される.

$$A = \begin{pmatrix} 4.65 & -0.673 & 0.228 \\ 2.40 & 7.29 & -1.36 \\ -0.617 & 2.78 & 5.52 \end{pmatrix} 10^{-3} \text{dB/g}. \quad (3.4)$$

Tabel 3.6 に感度の平均値に対する標準偏差を示す. 光損失から加速度への変換時に最も影響を受けると考えられる主軸感度の平均値に対するばらつきは $\pm 4\%$ であった. 3×3 感度マトリクスを用いてセンサ出力を加速度に換算, 補正する場合, 主軸感度の影響が横感度の影響よりも支配的であると考えられる. 従って, 横感度の標準偏差は主軸感度の標準偏差よりも相対的に大きい, その影響力は主軸感度よりも小さいと考えられる[32].

Fig. 3.22に40 Hzと80 Hzの正弦波振動を印加した際の加速度振幅応答特性を示す。提案光ファイバ加速度計の測定可能範囲である3×3感度マトリクスの適応範囲である10–90 Hzの周波数に対する感度を調べるために、その範囲から抽出した40 Hzと80 Hzの周波数について、印加加速度に対する光損失特性を評価した。Fig. 3.22に示すように、異なる周波数(40 Hzと80 Hz)の加速度に対して、光損失は高い線形性($R^2 > 0.998$)で増加していることが確認された。40 Hzと80 Hzの機械的な振動を与えた際の感度の違いは、周波数応答特性から分かるように、共振点付近で感度が若干高くなる。そのため、振幅応答特性においても、例えば S_{xy} の40 Hzと80 Hzにおける感度はそれぞれ、 2.16×10^{-3} dB/gと 2.76×10^{-3} dB/gであった[32]。

本研究で提案したセンサ構成は、立方体の固定台よりもファイバが外側に出ている構成になっており、実用化のためには筐体内にファイバが格納されている方が望ましい。そこで、固定台である立方体の内部に半円状の加速度計が3本収まるように設計したUVレジンで固定台とした3軸加速度計をFig. 3.23に示す。本研究では、アルミニウム合金の固定台に光ファイバを設置した3軸加速度計における性能を評価したが、今後実用化に向けてFig. 3.23に示すような構成のセンサにおいても同様の性能が得られるか検討する必要がある。

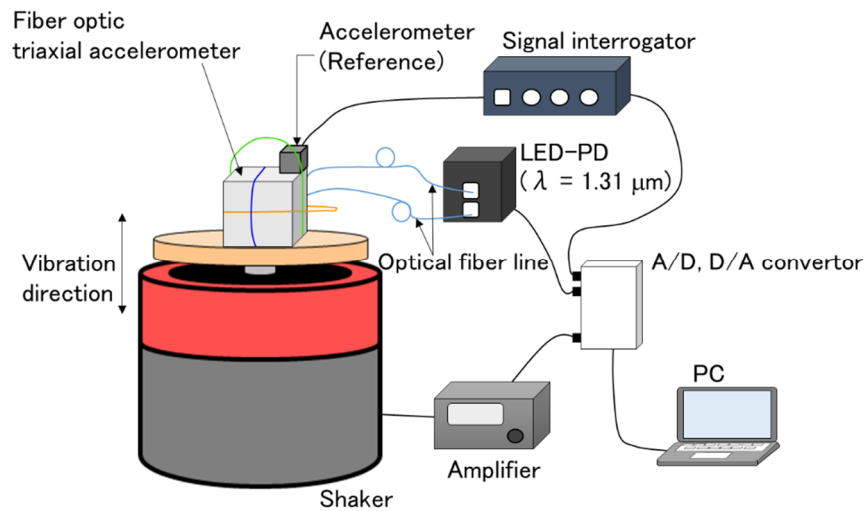


Fig. 3.20 Experimental setup of the triaxial semicircular hetero-core optical fiber accelerometer for evaluating mechanical vibration [32].

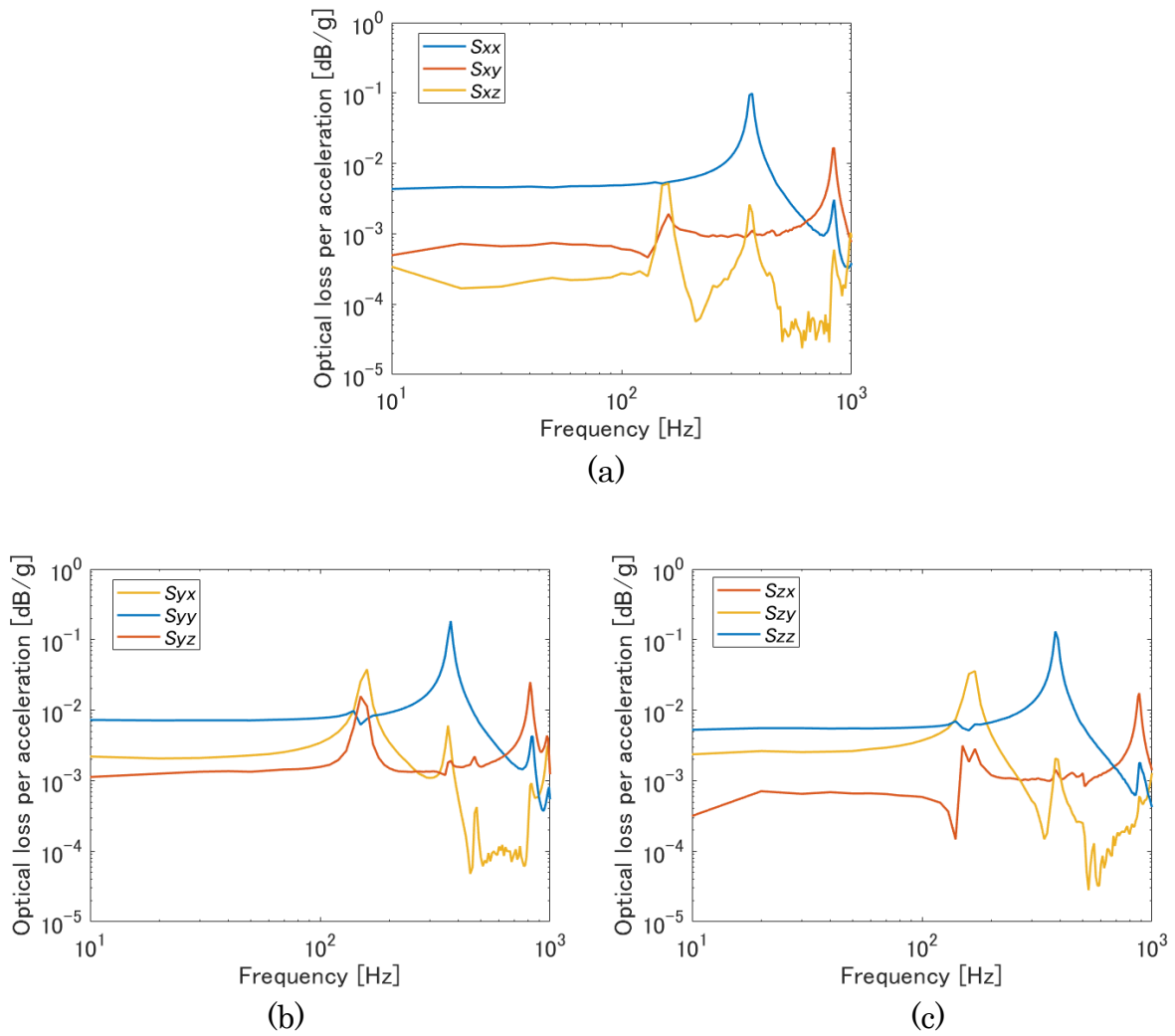


Fig. 3.21 Frequency response characteristics of the triaxial semicircular hetero-core optical fiber accelerometer for the (a) x-, (b) y-, and (c) z-axis sensors [32].

Table 3.6 The deviations of the 3-by-3 sensitivity matrix to the average sensitivity value [32].

Input axis	x	y	z
x-output	3.38%	10.6%	21.7%
y-output	13.8%	2.00%	8.31%
z-output	19.0%	11.5%	1.96%

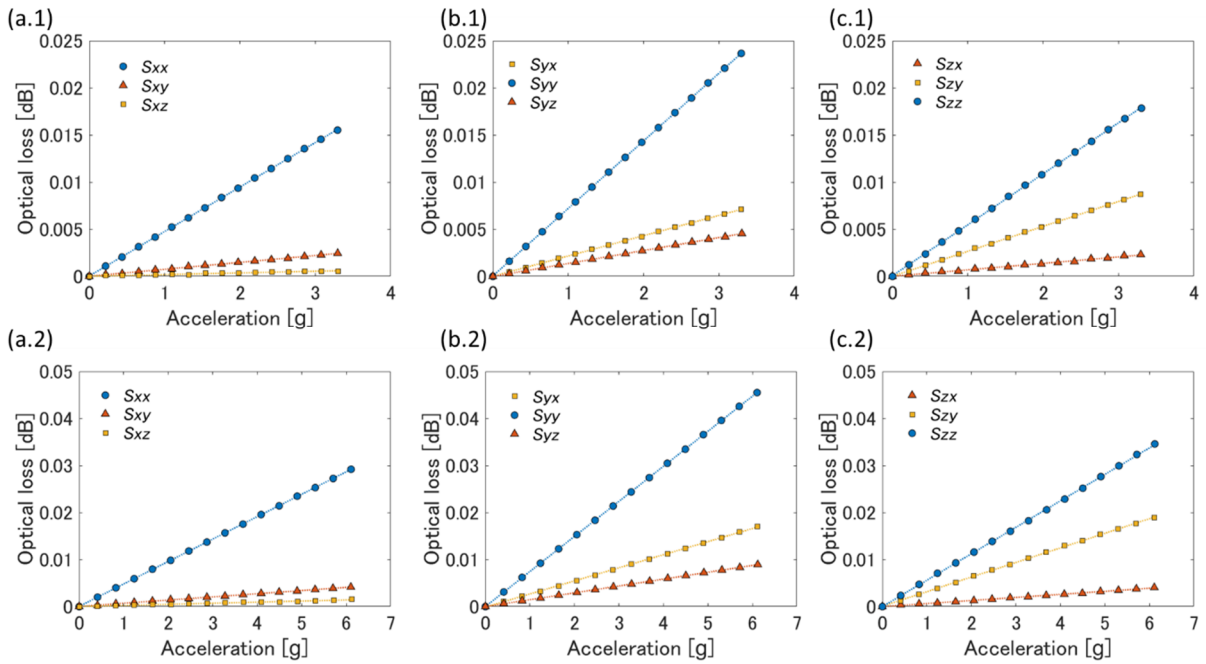


Fig. 3.22 Amplitude characteristics in acceleration of the triaxial semicircular hetero-core optical fiber accelerometer for (a) x-, (b) y-, and (c) z-axis sensor in (a.1)-(c.1) 40-Hz and (a.2)-(c.2) 80-Hz mechanical vibration [32].

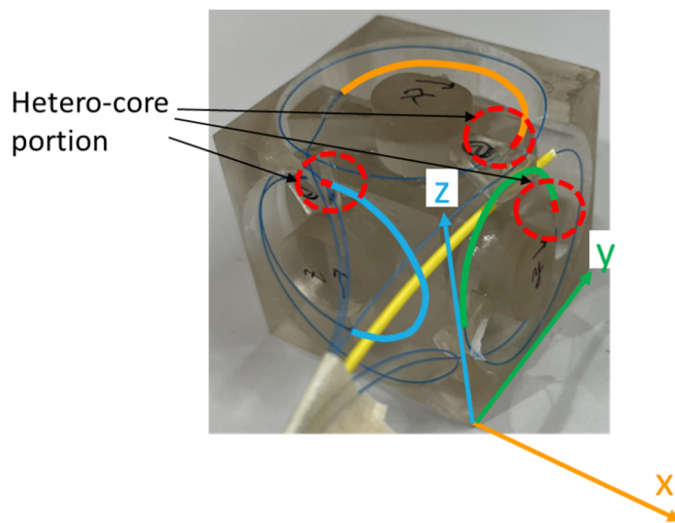


Fig. 3.23 External view of the triaxial semicircular hetero-core optical fiber accelerometer for practical use.

3.5.2 性能評価

3.5.2.1 実験条件

Fig. 3.24 に 3 軸加速度計の性能評価を行う際の、回転軸の定義を示す。本実験で使用する加振器は、1 方向のみに加振が可能であるため、提案光ファイバ加速度計に対して 2 軸または 3 軸方向に加振するためには筐体を傾けて加振する必要がある。本実験では、2 軸に対して加振する場合には、 y 軸回りに回転($\beta = 0^\circ$ に固定)させ、 δ を $0, 30, 45, 60, 90^\circ$ の条件下で実験を行った。また、3 軸に対して加振する実験では、 $\delta = 30^\circ$ に固定し、 β を $0, 30, 45, 60, 90^\circ$ の条件下で実験を行った。実験は Fig. 3.20 に示す実験構成を用いて加振、計測を行った。また、提案光ファイバ加速度計の機械的振動の測定可能周波数帯域は 90 Hz 以下であるため、サンプリングレート 10 kHz で得られた信号を 90 Hz をカットオフ周波数とするローパスフィルタを施した後に、 3×3 の感度マトリクスを用いて光損失から加速度への補正を行った。周波数 40 Hz と 80 Hz の正弦波振動を印加した際の振動測定値から FFT で求めた振幅に変換後、提案光ファイバ加速度計の評価を行った[32]。

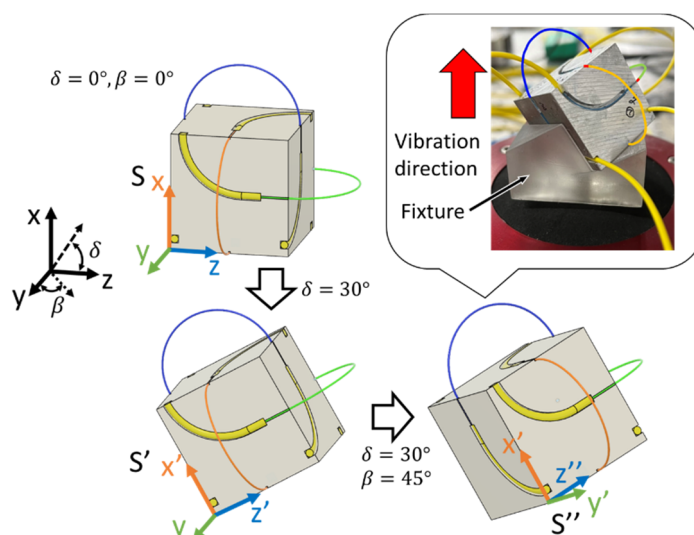


Fig. 3.24 Definition of rotary axis to the triaxial semicircular hetero-core optical fiber accelerometer [32].

3.5.2.2 時間応答

提案光ファイバ加速度計と参照用加速度計を $\delta = 30^\circ, \beta = 45^\circ$ に回転させ、加振器に設置して加振実験を行った際の時間応答波形を Fig. 3.25 に示す。 40 Hz と 80 Hz の両振動において、 3×3 感度マトリクスを用いられて補正された応答と主軸の感度を用いて換算された応答は、 40 Hz と 80 Hz のどちらの振動においても参照用加速度計と同様の正弦波状に変化していることを確認した。加速度振幅が最も大きい x 軸における応答は、主軸感度を用いて換算した加速度値と 3×3 感度マトリクスを用いて補正された加速度値はほぼ同じであった。 x 軸よりも加速度振幅が小さい y 軸と z 軸では、主軸感度での換算よりも 3×3 感度マトリクスを用いて補正した方が、加速度応答が参照用加速度計の応答と一致することが確認された。また、 z 軸に 40 Hz の正弦波振動を加えた場合、主軸で換算した応答は歪んだ正弦波波形となっていたが、 3×3 感度マトリクスを用いた応答では補正され、印加した正弦波

波形に近いものとなった。これらの結果から、横感度を考慮しない場合、振幅やリアルタイム信号波形を正確に計測することが難しいことが分かった。

x 軸センサの場合、 3×3 感度マトリクスを用いて補正した結果と主軸感度を用いて換算した結果の両方で、参照用加速度計と提案光ファイバ加速度計との間に位相差が生じていることが観測された。この位相差は、 3×3 感度マトリクスと主軸感度を用いた両方の変換結果で見られたため、半円状に湾曲した光ファイバ梁に由来するものと考えられる。40Hzと80 Hzの位相遅れはそれぞれ 7° と -12.8° であり、参照用加速度計の位相応答 $\pm 5^\circ$ よりも広範囲であった。提案光ファイバ加速度計の位相遅れは、ファイバの被覆材である紫外線硬化樹脂の粘弾性特性に起因すると考えられる。一般的に使用されている光ファイバ被覆材は粘弾性挙動を示すことが知られている[63]。さらに、これまでの研究により、一定の周波数と歪に対するポリマーファイバの応答は、粘弾性材料に特有の位相ずれが生じており、周波数が高くなるにつれて位相遅れが大きくなることが分かっている[64]。従って、紫外線硬化樹脂の被覆を除去するか、被覆に動的ヤング率の比較的高い材料を使用することで、位相差を除去することが可能である。

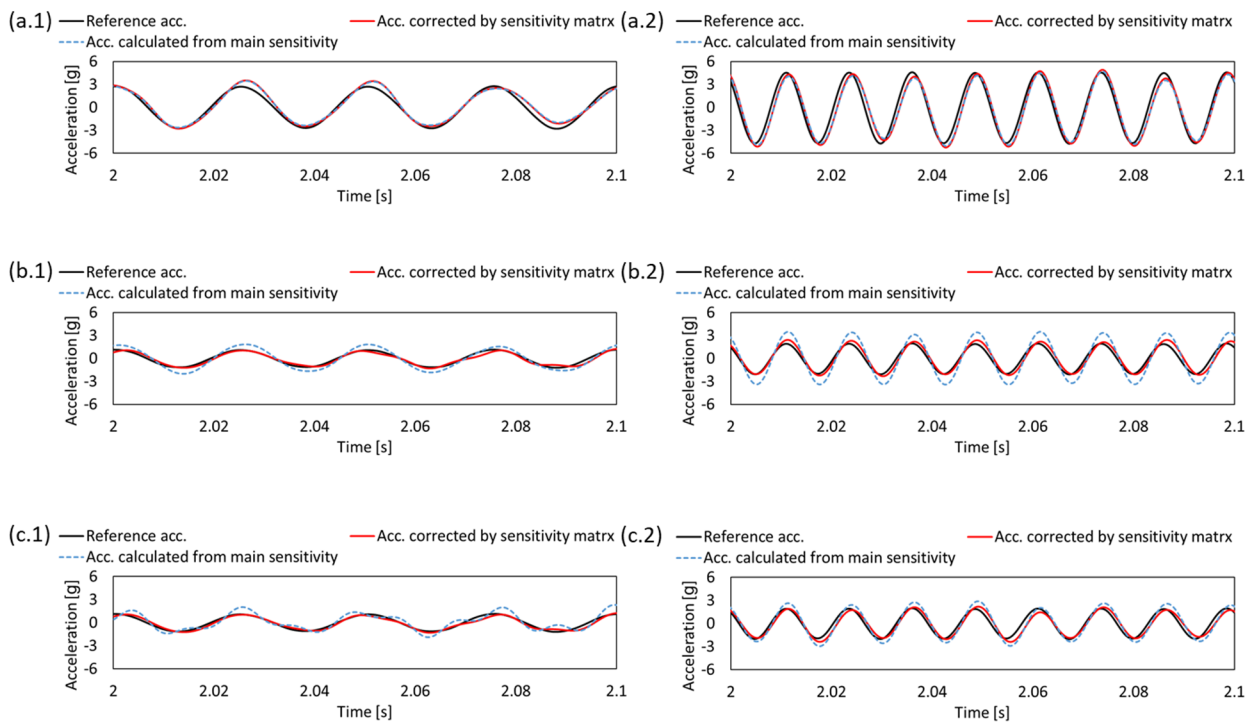


Fig. 3.25 Real-time responses of the triaxial semicircular hetero-core optical fiber accelerometer and reference accelerometer for (a) x -, (b) y -, and (c) z -axis sensor in sinusoidal vibration of (a.1)-(c.1) 40-Hz and (a.2)-(c.2) 80-Hz [32].

3.5.2.3 主軸感度および3×3感度マトリクスを用いて補正された加速度値に対する評価

回転角度に対する提案光ファイバ加速度計の換算後の加速度値と参照用加速度計、及び計算値の各軸の加速度値を Table 3.7と Table 3.8に、合成加速度の値を Table 3.9と Table 3.10に示す。また、回転角度に対する加速度の傾向を Fig. 3.26と Fig. 3.27に示す。傾けた時の各軸の理想の加速度の計算値は $\delta = 0^\circ$ の時にかかる加速度を基にして、回転行列を用いて計算したものである。

Fig. 3.26と Fig. 3.27に示すように、主軸感度を用いた変換では、横感度の影響により提案光ファイバ加速度計の加速度の傾向が参照用加速度計の加速度と大きく異なっていた。しかし、3×3感度マトリクスを用いて補正すると、提案光ファイバ加速度計の傾向は良好に補正され、参照用加速度計の応答と類似した傾向になったことが確認された。特に、y軸センサの応答において、主軸感度のみを用いた換算結果は3×3感度マトリクスを用いた補正結果と参照用加速度計の計測値に対して比較的大きな偏差があることが分かる。これは、各軸のセンサが対象に設置されているにも関わらず、式(3.4)に示したy軸センサの主軸感度が、他の軸のセンサよりも大きく算出され、さらに横感度が比較的高かったためである。そのため、横感度を用いて感度を補正する必要がある。製造上の誤差により、各軸の主軸感度に差が生じることは避けられない。しかしながら、加速度への変換時に感度マトリクスを適用することで、製造上の差異を補正できることが実験結果から確認された。40 Hzと80 Hzという異なる周波数と加速度を印加した場合でも、3×3感度マトリクスを用いて補正した結果は、80 Hzを印加した場合のように、主軸感度のみを用いて変換した結果よりも、参照用加速度計で測定された加速度及び計算上の加速度との整合性が高いことが確認された。以上の結果より、3×3感度マトリクスを用いることで相対誤差が大幅に減少することが分かった。

Table 3.7と Table 3.8は、 $\beta = 0^\circ$ で固定し δ を変化させた場合と、 $\delta = 30^\circ$ で固定し β を変化させた場合の提案光ファイバ加速度計の変換結果である。また、3×3の感度マトリクスと主軸感度を用いた場合の提案光ファイバ加速度計の誤差は、参照用加速度計との相対誤差を算出した。計算値の加速度が0の場合を除き、相対誤差を評価した。角度 β を 0° に固定し、角度 δ を変化させた場合、y方向の加速度算出値は常に0であった。したがって、 $\beta = 0^\circ$ の場合は、x軸とz軸の加速度で評価を行った。Table 3.8の誤差に着目すると、印加周波数40Hzにおいて主軸感度を用いて換算した加速度は、印加加速度が小さくなるにつれて誤差が大きくなっていることがわかる。これに対し、感度マトリクスを用いて加速度を補正すると、印加される加速度の大きさにかかわらず、十分に誤差を補正することができた。また、印加周波数が80Hzの場合の実験結果においても、40Hzの場合と同じであることが示された(Table 3.8)。また、80Hzの印加周波数で感度マトリクスを用いて補正した場合の誤差に着目すると、x軸方向センサの誤差が比較的大きいことが分かる。これは、x軸センサの主軸方向の感度が、感度マトリクスと80Hzで異なる値になっていたためである。この感度の違いは、光ファイバ梁の構造的な減衰により、共振周波数以下では感度が徐々に低下するためである。これは、構造的な減衰を誘発する紫外線硬化樹脂被覆から、動的ヤング率の高い材料に被覆材料を変更することで改善されることが期待される。3×3感度マトリクスを用いて補正した場合の最大相対誤差は8.90%以下、主軸感度を用いた場合は28.8%以下と、感度マトリクスを用いた場合では相対誤差が大幅に改善された。Table 3.8は、角度 δ を 30° に固定し、角度 β を変化させて提案光ファイバ加速度計の3軸すべてに加わる条件下で加速度を評価した相対誤差を示す。この条件では、3×3感度マトリクスで補正された相対誤差の最大値は20.2%、主軸感度での換算では88.3%であった。y軸の変換結果は、印加周波数40Hzと80Hzの両方で主軸感度だけを用いた変換においては比較的大きな相対誤差

を示しており、これはy軸センサの面内圧縮変形方向と面外曲げ変形方向の両方の横感度が大きいためだと考えられる。Table 3.7 に示した 1 軸の周りに回転させた場合と同様に、感度マトリクスで補正することで相対誤差を小さくすることが可能である。これらの実験結果から、 3×3 の感度マトリクスを用いた補正は、主軸感度を用いた変換よりも、より印加加速度に近い値に補正され、相対誤差が 20.2%以下となることが確認された。

Table 3.9 及び Table 3.10 は、Table 3.7 および Table 3.8 に示した各軸の 3 つの加速度から得られる合成加速度と、その相対誤差を示したものである。角度 δ を 30° に固定し、角度 β を変化させた条件、つまり提案光ファイバ加速度計の 3 軸すべてに加速度を加えた条件に着目すると、 3×3 感度マトリクスで補正した場合と主軸感度のみで変換した場合の相対誤差はそれぞれ 6.97%、20.2%を下回っていることが分かる。したがって、 3×3 感度マトリクスで補正した方が、主軸感度のみで補正した場合よりも、結果的に加速度の相対誤差が小さくなることも示された[32]。

3.6 結言

本章では、回転機器の異常診断のためのヘテロコア光ファイバ加速度計の開発および感度向上を目的として、ヘテロコア光ファイバを半円の固定端付近に位置した両端固定支持梁構造の加速度計を提案し、面内せん断変形方向、面外曲げ変形方向、面内圧縮変形方向の 3 方向における静的特性である強制変位特性および、動的特性である周波数応答特性、加速度振幅応答特性を実験的に明らかにし、構造解析のための作成した提案加速度計のモデルの妥当性について評価した。強制変位特性においては、ヘテロコア部における初期曲率が生じている方向と生じていない方向において、変位に対する感度差が生じており、初期曲率が生じている面内せん断変形方向に対して最も高い感度を有していることが明らかになった。この結果から、変形方向つまり加速度が印加された方向に対して感度差が生じるため方向検知が可能であることが示された。また、周波数応答特性において、強制変位特性同様に、振動の印加方向によって感度差が生じており、面内せん断変形方向に最も高い感度を有しており、加速度振幅に対する光損失変化は非常に高い線形性を有していることを実験的に確認した。構造解析に作成された光ファイバ梁モデルは、実験で得られた周波数応答特性と良好な一致が見られ、整合性が確認された。また、曲率半径の違いによって感度と共振周波数及び計測可能周波数範囲にトレードオフの関係があることが示された。これらの特徴を活かし、3 軸加速度計に拡張したところ、横感度の影響をより補正するために、事前に周波数応答特性から算出される 3×3 感度マトリクスを用いることで大幅に補正されることが性能評価実験で検証された。以上の結果から、提案加速度計は感度向上及び横感度の低下に成功し、3 軸加速度計への拡張を実現した。

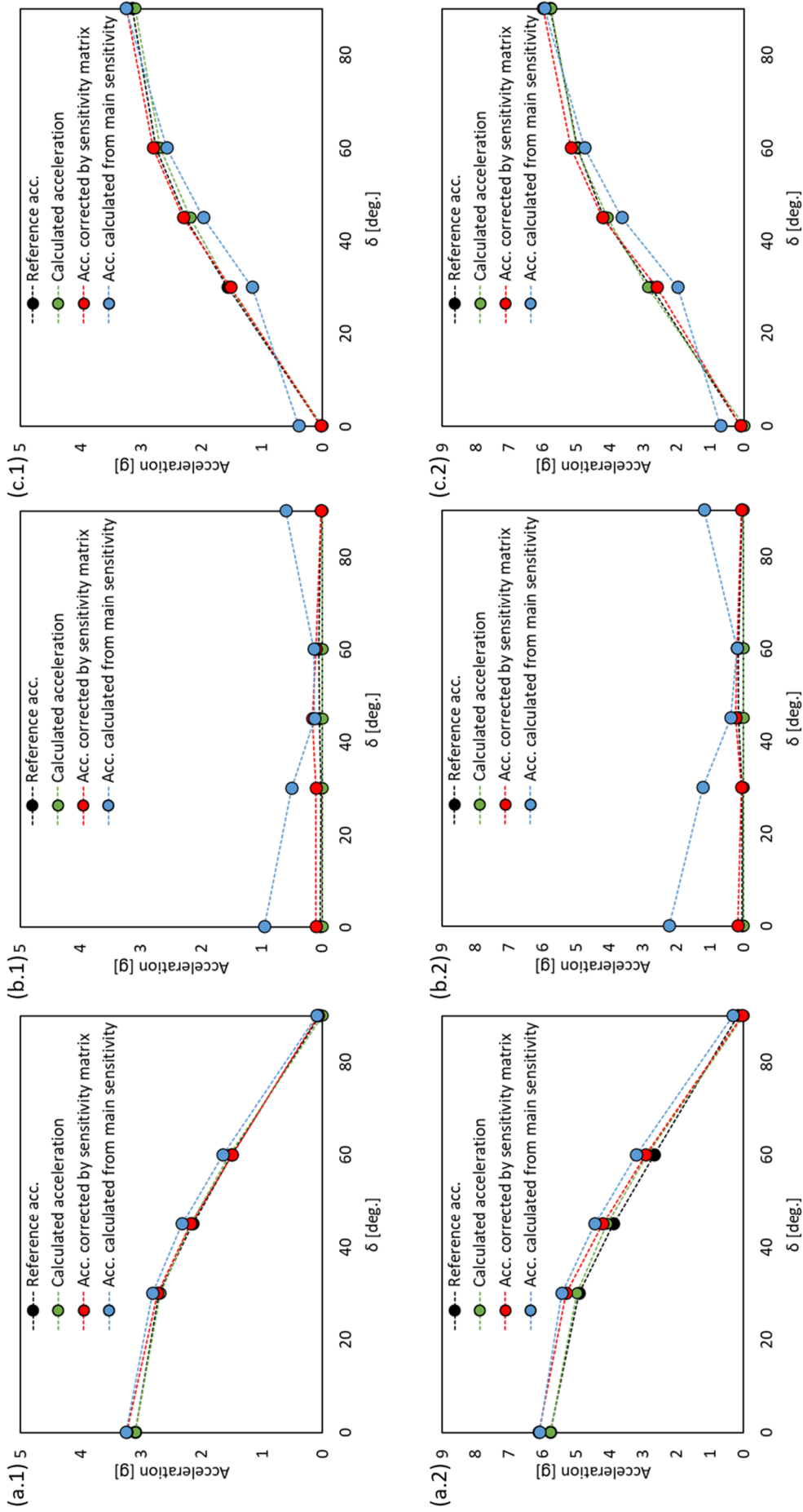


Fig. 3.26 Conversion results of triaxial semicircular curved hetero-core optical fiber accelerometer for (a) x-, (b) y-, and (c) z-axis when varying δ in (a.1)-(c.1) 40-Hz and (a.2)-(c.2) 80-Hz mechanical vibration with fixed β at 0 degrees [32].

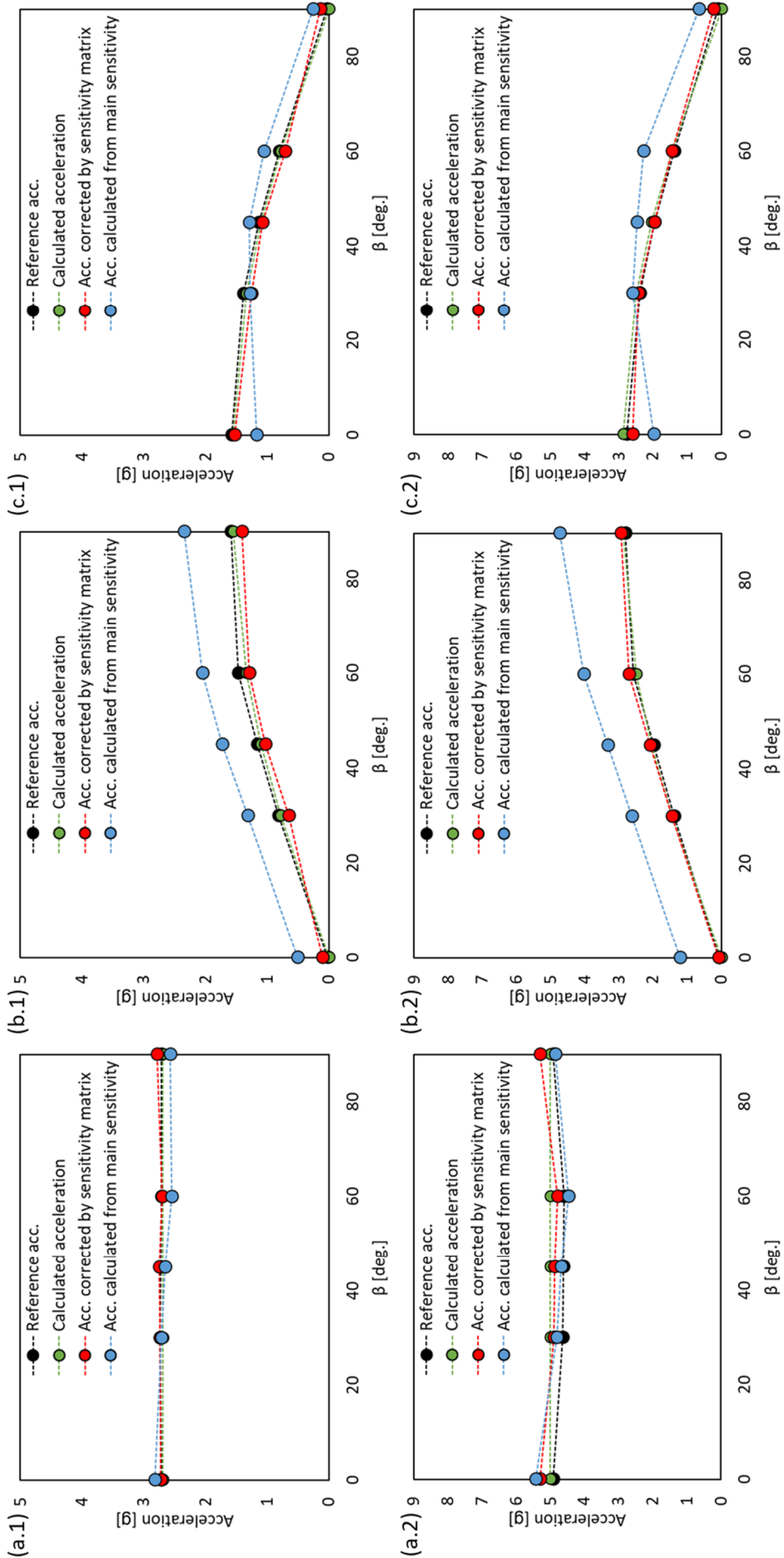


Fig. 3.27 Conversion results of triaxial semicircular curved hetero-core optical fiber accelerometer for (a) x-, (b) y-, and (c) z-axis when δ was fixed at 30 degrees and β was varied in (a.1)-(c.1) 40-Hz and (a.2)-(c.2) 80-Hz mechanical vibration [32].

Table 3.7 Conversion results of triaxial semicircular curved hetero-core optical fiber accelerometer and relative error to the reference accelerometer when varying δ with fixed β at 0 degrees in 40-Hz and 80-Hz mechanical vibration [32].

δ	Calculated acceleration [g]			Reference acc. [g]			Acc. corrected by sensitivity matrix [g]			Acc. calculated from main sensitivity [g]			Error when using sensitivity matrix [%]			Error when using main sensitivity [%]		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
40 Hz																		
0	3.10	0	0	3.10	0.0300	0.0238	3.25	0.103	0.0295	3.26	0.961	0.390	4.70	-	-	5.22	-	-
30	2.69	0	1.55	2.71	0.0249	1.57	2.73	0.106	1.53	2.82	0.509	1.17	0.684	-	3.07	4.01	-	25.8
45	2.19	0	2.19	2.15	0.0472	2.28	2.19	0.165	2.30	2.33	0.131	1.97	1.81	-	1.07	8.14	-	13.3
60	1.55	0	2.69	1.52	0.0547	2.75	1.50	0.107	2.80	1.65	0.136	2.58	1.22	-	1.74	8.85	-	6.30
90	0	0	3.10	0.0506	0.0180	3.15	0.0807	0.0242	3.24	0.0998	0.606	3.26	-	-	2.89	-	-	3.48
80 Hz																		
0	5.77	0	0	5.77	0.0554	0.0913	6.13	0.184	0.100	6.10	2.22	0.692	6.18	-	-	5.64	-	-
30	5.00	0	2.89	4.92	0.0515	2.78	5.30	0.0725	2.59	5.43	1.22	1.98	7.78	-	6.66	10.5	-	28.8
45	4.08	0	4.08	3.90	0.152	4.18	4.22	0.233	4.23	4.46	0.379	3.64	8.17	-	1.14	14.3	-	12.9
60	2.89	0	5.00	2.69	0.152	4.98	2.93	0.196	5.17	3.21	0.194	4.75	8.90	-	3.81	19.4	-	4.68
90	0	0	5.77	0.182	0.0441	5.79	0.0434	0.0633	5.99	0.325	1.18	5.96	-	-	3.58	-	-	2.99

Table 3.8 Conversion results of triaxial semicircular curved hetero-core optical fiber accelerometer and relative error to the reference accelerometer when δ was fixed at 30 degrees and β was varied in 40-Hz and 80-Hz mechanical vibration [32].

β	Calculated acceleration [g]			Reference acc. [g]			Acc. corrected by sensitivity matrix [g]			Acc. calculated from main sensitivity [g]			Error when using sensitivity matrix [%]			Error when using main sensitivity [%]		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
40 Hz																		
0	2.69	0	1.55	2.71	0.0249	1.57	2.73	0.106	1.53	2.82	0.509	1.17	0.685	-	3.07	4.01	-	25.8
30	2.69	0.775	1.34	2.74	0.815	1.38	2.74	0.650	1.25	2.71	1.32	1.27	0.170	20.2	9.24	1.02	61.9	7.73
45	2.69	1.10	1.10	2.72	1.15	1.13	2.75	1.02	1.08	2.66	1.73	1.29	1.07	11.3	4.51	2.43	49.7	13.9
60	2.69	1.34	0.775	2.71	1.46	0.802	2.70	1.29	0.704	2.55	2.05	1.05	0.490	11.8	12.2	6.10	40.0	31.1
90	2.69	1.55	0	2.72	1.58	0.0278	2.79	1.40	0.138	2.58	2.35	0.261	2.57	11.2	-	5.15	48.4	-
80 Hz																		
0	5.00	0	2.89	4.92	0.0515	2.78	5.30	0.0725	2.59	5.43	1.22	1.98	7.78	-	6.66	10.5	-	28.8
30	5.00	1.44	2.50	4.65	1.39	2.39	4.91	1.45	2.42	4.82	2.62	2.60	5.62	4.61	1.13	3.65	88.3	8.74
45	5.00	2.04	2.04	4.61	1.97	1.95	4.89	2.08	1.96	4.68	3.32	2.47	5.95	5.39	0.691	1.51	68.3	26.4
60	5.00	2.50	1.44	4.59	2.58	1.38	4.79	2.71	1.44	4.47	4.02	2.27	4.39	5.25	4.80	2.62	56.0	65.1
90	5.00	2.89	0	4.92	2.81	0.104	5.29	2.95	0.232	4.86	4.74	0.664	7.51	5.04	-	1.39	68.6	-

Table 3.9 Resultant accelerations of triaxial semicircular hetero-core optical fiber accelerometer and resultant acceleration relative error to the reference accelerometer when varying δ with fixed β at 0 degrees in 40-Hz and 80-Hz mechanical vibration [32].

δ	Resultant acceleration [g]			Resultant acceleration error [%]		
	Calculated acceleration	Reference	Corrected by sensitivity matrix	Calculated from main sensitivity	Corrected by sensitivity matrix	Calculated from main sensitivity
40 Hz						
0	3.10	3.10	3.25	3.42	4.75	10.4
30	3.10	3.13	3.13	3.09	0.20	1.31
45	3.10	3.13	3.18	3.05	1.54	2.50
60	3.10	3.14	3.18	3.07	1.10	2.48
90	3.10	3.15	3.24	3.32	2.91	5.28
80 Hz						
0	5.77	5.77	6.13	6.52	6.22	13.0
30	5.77	5.65	5.90	5.91	4.47	4.61
45	5.77	5.72	5.98	5.77	4.51	0.88
60	5.77	5.66	5.95	5.73	5.00	1.26
90	5.77	5.79	5.99	6.08	3.54	5.07

Table 3.10 Resultant accelerations of triaxial semicircular hetero-core optical fiber accelerometer and resultant acceleration relative error to the reference accelerometer when δ was fixed at 30 degrees and β was varied in 40-Hz and 80-Hz mechanical vibration [32].

β	Resultant acceleration [g]			Resultant acceleration error [%]		
	Calculated acceleration	Reference	Corrected by sensitivity matrix	Calculated from main sensitivity	Corrected by sensitivity matrix	Calculated from main sensitivity
40 Hz						
0	3.10	3.13	3.13	3.09	0.20	1.31
30	3.10	3.17	3.09	3.27	2.78	3.14
45	3.10	3.17	3.13	3.42	1.19	8.05
60	3.10	3.19	3.07	3.43	3.49	7.80
90	3.10	3.14	3.12	3.50	0.638	11.2
80 Hz						
0	5.77	5.65	5.90	5.91	4.47	4.61
30	5.77	5.41	5.66	6.07	4.68	12.2
45	5.77	5.38	5.66	6.25	5.20	16.1
60	5.77	5.44	5.70	6.43	4.61	18.1
90	5.77	5.70	6.07	6.82	6.97	20.2

第4章 低周波領域における両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の感度向上

4.1 緒言

本章では、大型構造物モニタリングのために低周波領域における感度向上を目的とし、第3章で提案した半円型の両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計に付加質量を設置した構成のセンサを提案する。これまでに大型構造物モニタリングを対象にした振り子型ヘテロコア光ファイバ加速度計が開発されてきている[27]。しかし、振り子型ヘテロコア光ファイバ加速度計は付加質量、バネ、ベアリングといった比較的大きな機構を有していることから、筐体が縦 100 mm、横 42 mm、高さ 23 mm と体積が比較的大きい。航空機や宇宙機に加速度計を搭載する際には、体積や重量は輸送または打ち上げコストに比例するため、体積が小さく軽量なものが望まれる。半円型の両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバは光ファイバと固定台のみでの構成であるため、振り子型と比較すると小型であるが、感度が低いといった課題を有する。そこで、半円の中心に付加質量を設置することで感度の向上が見込まれる。周波数応答特性による実験から、付加質量の違いによる面内せん断変形方向及び面外曲げ変形方向における感度と横感度に関して評価を行った。また、付加質量を設置したセンサ構成における構造解析のためのモデルを作成し、FE 解析によるモード形状、固有周波数、感度に関して実験結果との整合性を確認した。

4.2 センサ構成

提案する質量を付加したヘテロコア光ファイバ加速度計を Fig. 4.1 に示す。3章で述べた片持ち梁の荷重によるたわみモデルの原理に基づくと、先端に付加質量を設置することで同じ荷重であっても梁がよりたわむため、本研究では、これまでに提案してきた半円に湾曲したファイバ梁の半円の中央に付加質量を設置する構成を提案する。提案する質量を付加した光ファイバ加速度計で用いるヘテロコア光ファイバは、3章と同様に、曲げに対する光損失特性が単調かつ感度が比較的高い構造である、伝送路ファイバのコア径に 9 μm 、ヘテロコア部のコア径に 3 μm のシングルモードファイバを用い、センサ長 1 mm の構造を採用した。また、固定台にはステンレス(SUS303)を用い、半円の光ファイバを固定台にシアノアクリレート接着剤によって固定した。また本実験では、付加質量の条件の違いによるセンサの応答を比較するため、曲率半径は 15 mm に固定し、付加質量の条件は付加質量 0.2 g, 0.07 g, 付加質量なしの3種類とし、センサを作製し実験評価を行った[33][34]。

4.3 周波数応答特性

4.3.1 実験構成

Fig. 4.2 に、質量を付加した提案光ファイバ加速度計の周波数応答評価のための実験構成を示す。本実験では、加振器(WaveMaker05, Asahi Seisakusyo)に取り付けられた固定台の上に、質量を付加した提案光ファイバ加速度計と参照用加速度計(356A16, PCB Piezotronics, Inc.)を設置し、周波数範囲 2 – 500 Hz で 2 Hz 刻みで正弦波振動を印加した。質量を付加した提案光ファイバ加速度計は中心波長 1.31 μm の LED 光源と受光部に PD が用いられている計測器(iLineBox4C, Core System Japan Co., Ltd.)によって、光損失変化として計測を行った。また、質量を付加した提案加速度計と参照用加速度計の測定値は、サンプリングレート 10 kHz で同時に計測を行い、加振

器に対して一定の電圧で制御を行った。そのため、印加周波数ごとで加速度が異なるため、提案加速度計の周波数に対する感度は、印加周波数ごとに提案加速度計から得られた光損失と参照用加速度計から得られた時間応答信号に **FFT** を施し、印加した周波数成分の値の比から算出した[32]。

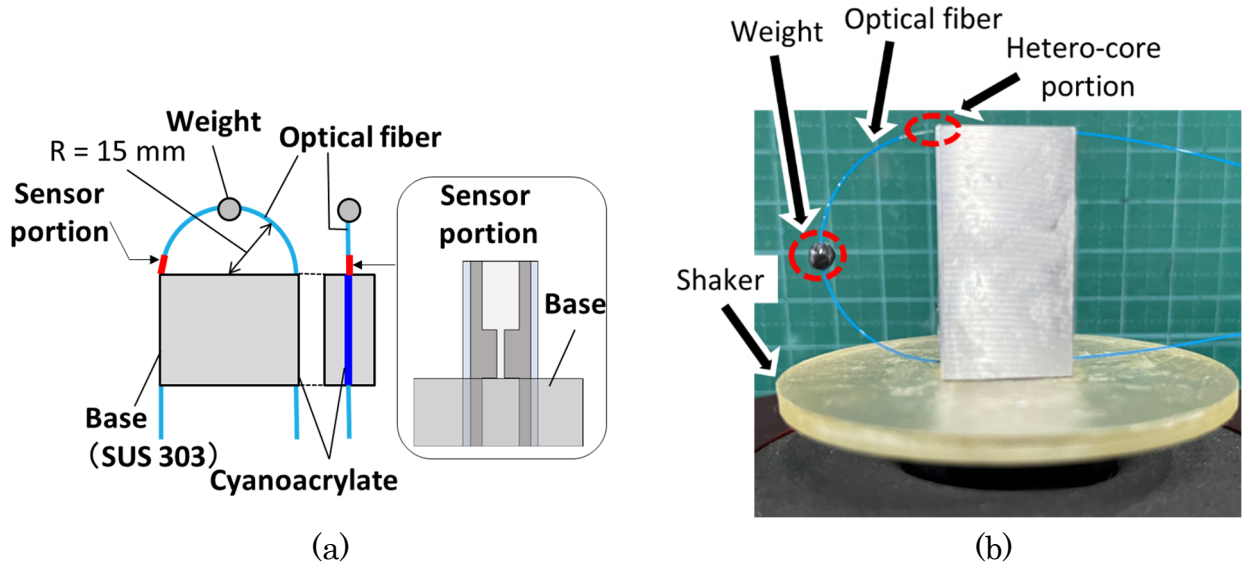


Fig. 4.1. Configuration of a semicircular hetero-core fiber optic accelerometer with weight; (a) accelerometer structure, and (b) photo of shaking setup [32].

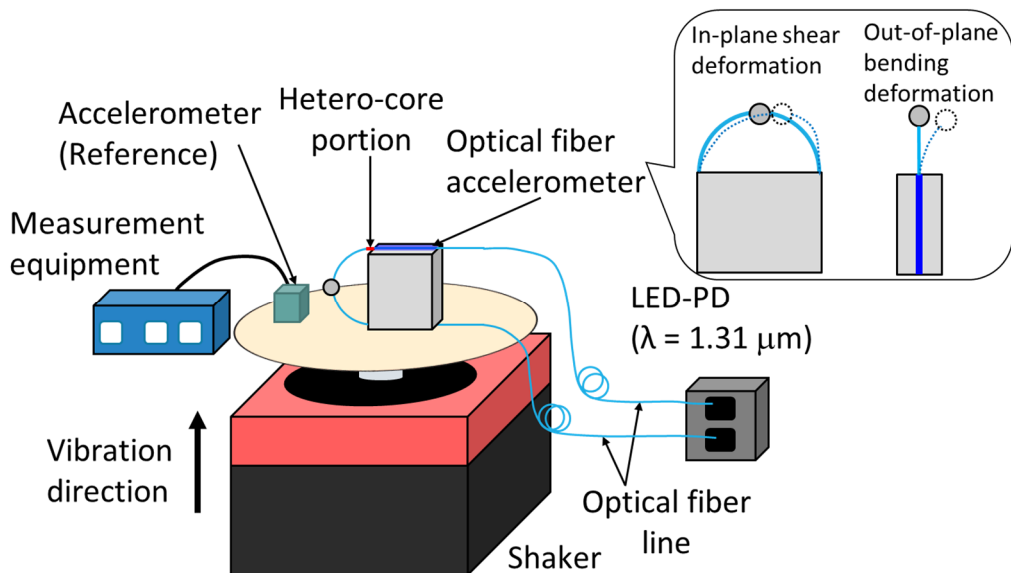


Fig. 4.2. Experimental setup of the hetero-core fiber optic accelerometer for evaluating frequency characteristics of the in-plane shear deformation and out-of-plane bending deformation [32].

4.3.2 実験結果

Fig. 4.3に10 Hzの正弦波振動を印加した際の提案光ファイバ加速度計と参照用加速度計の時間応答を示す。付加質量0.2 gと0.07 gにおいては、参照用と同様の正弦波応答を示していることが確認された。付加質量なしにおいては、他の付加質量の条件と比較し、感度が低いため、0.2 g程度の加速度では正弦波応答は確認されなかった。しかし、FFTを施した際のスペクトルでは印加した10 Hzにピークが生じていることが確認された。Fig. 4.4に、実験から得られた質量を付加した提案光ファイバ加速度計の面内せん断変形方向、面外曲げ変形方向における周波数応答特性を示す。全ての付加質量の条件の提案光ファイバ加速度計において、共振周波数以下において、面外曲げ変形方向よりも面内せん断変形方向の感度の方が高いことが確認され、質量を付加したセンサであっても面内せん断変形方向に主軸感度を有していることが示された。面外曲げ変形方向と面内せん断変形方向における第一共振周波数は、付加質量0.2 gにおいて12 Hzと44 Hz、付加質量0.07 gにおいて22 Hzと86 Hz、付加質量なしにおいて152 Hzと350 Hzであった。付加質量0.2 gと付加質量なしの条件において、面内せん断変形方向の周波数応答特性ではそれぞれ12 Hzと156 Hz付近で感度が急激に変化しており、面外曲げ変形方向の共振周波数の影響を受けていると考えられる。これは、センサ作製時において光ファイバの半円を作る2箇所固定端が対象に設置されていないためであると考えられる。仮に、固定端が対称に設置されていれば、付加質量0.07 gの条件のセンサの周波数応答特性のように、面内せん断変形方向に振動を印加した際に面外曲げ変形方向の共振周波数の影響が受けにくいと考えられる。しかし、少しでもずれが生じることで、面内せん断変形方向に振動を印加した場合においても面外曲げ変形方向の共振周波数の影響を受けてしまう。

加速度計として使用可能な感度が安定している周波数範囲において感度の平均を算出し、面内せん断変形方向に対する面外曲げ変形方向の感度評価を行った。付加質量の条件によって感度が安定している周波数範囲が異なるため、付加質量0.2 gと0.07 gにおいては、周波数範囲2–10 Hz、付加質量なしにおいては面内せん断変形方向においては2–90 Hzの周波数範囲、面外曲げ変形方向においては低周波数帯域において感度が不十分であり計測が困難であったため、周波数範囲10–90 Hzで評価を行った。面内せん断変形方向における各付加質量の条件での平均感度は、付加質量0.2 gにおいて 4.4×10^{-1} dB/g、付加質量0.07 gにおいて 1.3×10^{-1} dB/g、付加質量なしにおいて 8.1×10^{-3} dB/gであった。また、面外曲げ変形方向における各付加質量の条件下での平均感度は、付加質量0.2 gにおいて 1.1×10^{-1} dB/g、付加質量0.07 gにおいて 2.0×10^{-2} dB/g、付加質量なしにおいて 1.2×10^{-3} dB/gであった。これらの算出された平均感度の標準偏差をTable 4.1に示す。提案光ファイバ加速度計の面内せん断変形方向における、平均感度のばらつきは全ての付加質量の条件下で10%以下であり、従来の振り子型ヘテロコア光ファイバ加速度計の計測可能周波数範囲での誤差7%以下[27]と同等の性能であることが確認された。また、面内せん断変形方向を主軸感度としたときの横感度は、付加質量0.2 g、付加質量0.07 g、付加質量なしのそれぞれで25%、15%、15%であった。付加質量を重くしていくと、感度が高くなり共振周波数が下がっていく傾向があり、重さに対して共振周波数と感度にトレードオフの関係があることが実験的に確認された。ヘテロコア光ファイバを用いた振り子型の加速度計では、共振周波数が20 Hzで計測範囲をおよそ10 Hz程度までとしている構成において感度は 1.3×10^{-1} dB/gであった[27]。この構成と同等の計測範囲である0.2 gの付加質量を用いた提案光ファイバ加速度計は従来の振り子型と比較すると感度が約3.3倍向上したことが確認された。以前報告されたものでは感度の向上は約2.4倍であったため[33][34]、今後製

造誤差について調査する必要がある。

以上の結果より、光ファイバと小さな付加質量を用いた簡素な構成で、低周波数帯域において感度の向上に成功し、大規模な構造物ヘルスマニタリングに有用であることが示された。また、付加質量を設置した場合においても振動の方向によって感度差が生じていることから、振動の方向検知と 3 軸加速度計への拡張も期待される。

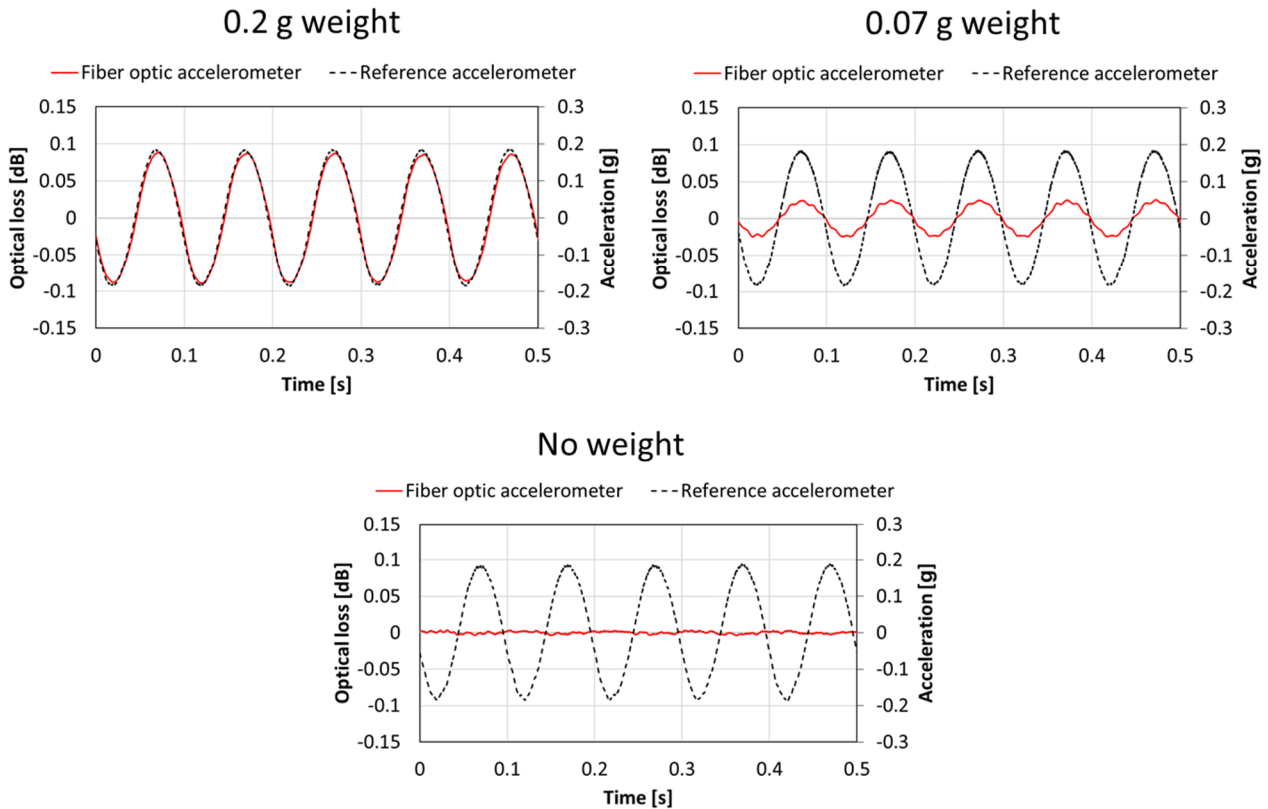


Fig. 4.3 Real time response of the proposed fiber optic accelerometer and reference accelerometer when a sinusoidal vibration of 10 Hz was applied [33][34].

Table 4.1 Standard deviation of the sensitivity average [33][34].

Weight [g]	In-plane shear deformation		Out-of-plane bending deformation	
	Standard deviation [dB]	Standard deviation [%]	Standard deviation [dB]	Standard deviation [%]
0.2	4×10^{-2}	9.24	4×10^{-2}	36.1
0.07	7×10^{-3}	5.16	5×10^{-3}	22.7
No weight	3×10^{-4}	4.03	1×10^{-4}	10.7

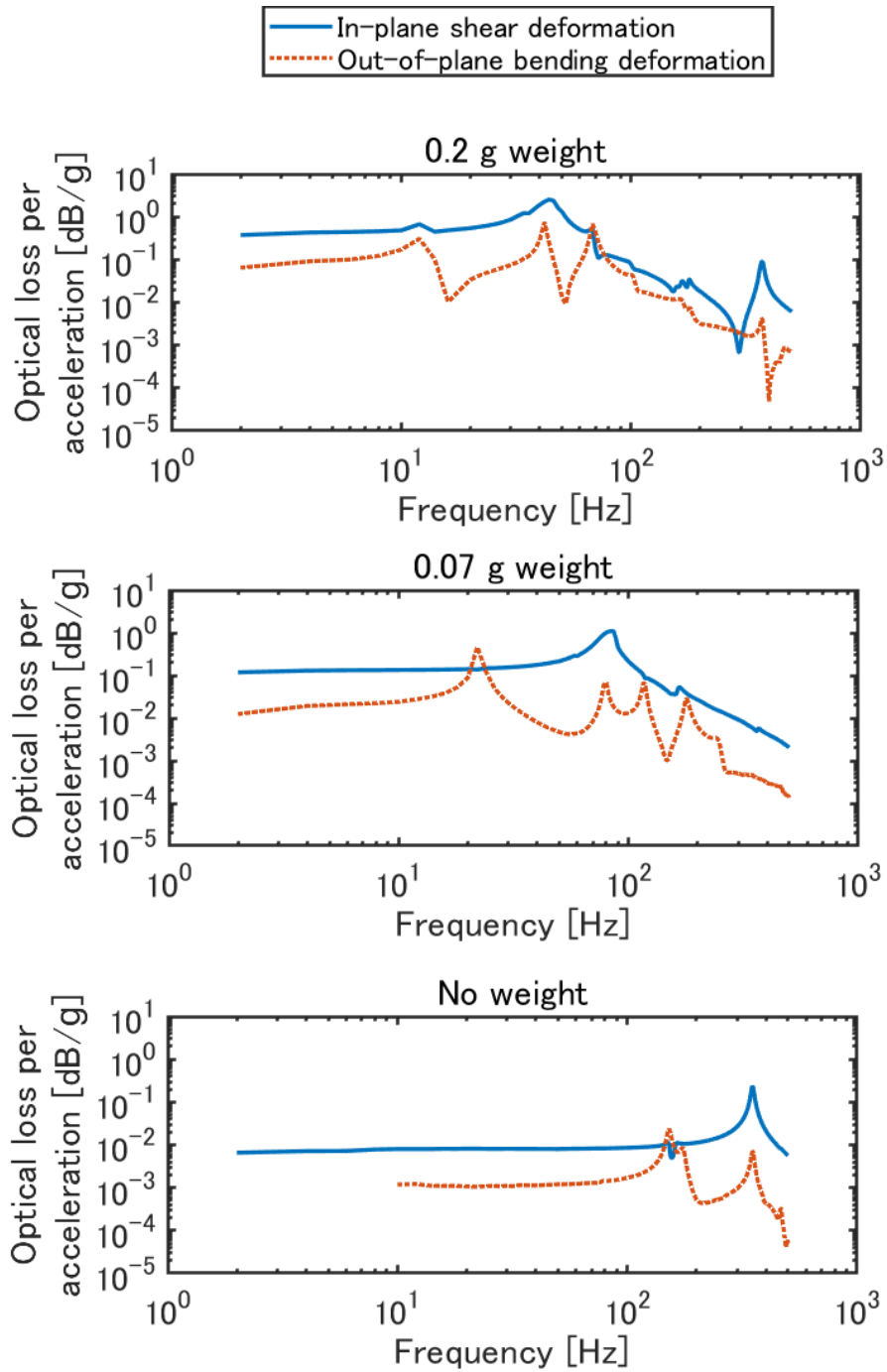


Fig. 4.4 Frequency response characteristics of the in-plane shear deformation and the out-of-plane bending deformation with 0.2 g, 0.07g, and no weights [33][34].

4.4 有限要素 (FE) 解析

低周波領域における感度向上を目指した質量を付加した両端固定支持梁構造へテロコア光ファイバ加速度計に対しても、3.4.2と同様にFE解析を行った。Fig. 4.5にシミュレーションで用いる加速度計のモデルを示す。3.4.2で述べたプライマリ層の物性値[60]と参考文献[28]の物性値を参考にしたパラメータを質量を付加した加速度計モデルに適応したところ、1次のモード形状の出力の結果が光ファイバが直角に曲がっているような形状になり、実験の際には光ファイバが破損せずにセンサとして機能していることから、このような形状が現実には起こっているとは考えにくい。これは、被覆のヤング率が低いことが原因であると考えられる。そのため、本節では、セカンダリ層の物性値[60]と参考文献[30]の物性値を参考にし、二つ目に設定したパラメータを用いてFE解析を行った。

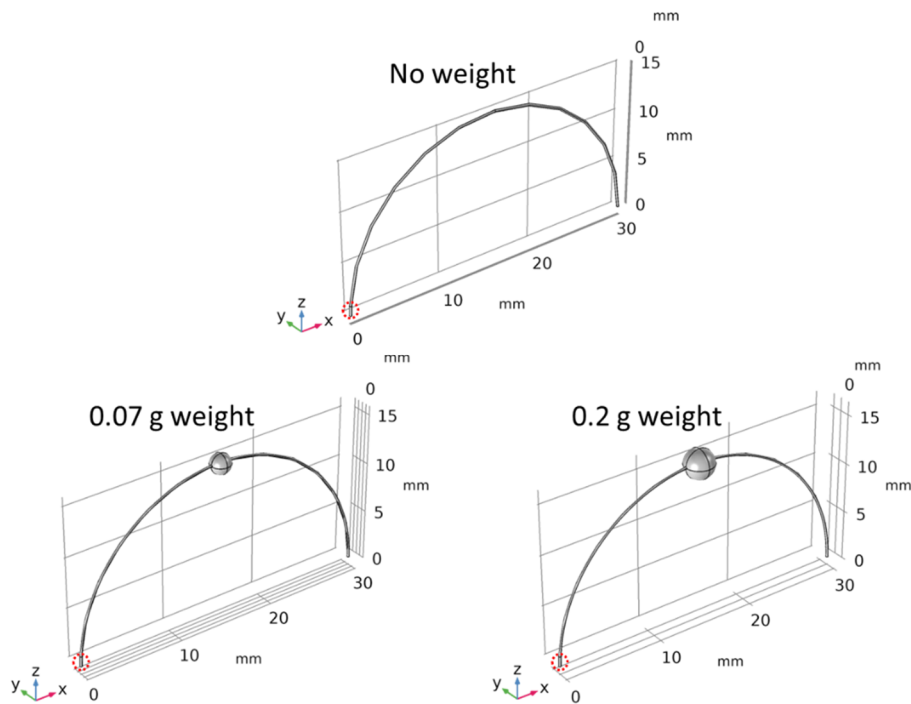


Fig. 4.5 Frequency response characteristics of the in-plane shear deformation and the out-of-plane bending deformation with 0.2 g, 0.07g, and no weights [34].

Fig. 4.6, Fig. 4.7, Fig.4.8に付加質量なし, 付加質量 0.07 g, 付加質量 0.2 g の条件における1次から4次のモード形状を示す。付加質量なしの条件においては、前述したように1次のモードでは面外曲げ変形、2次モードでは面内せん断変形、3次のモードでは面外曲げ変形、4次のモードでは面内圧縮変形が起きていることが確認された。一方、質量を付加した両条件においては、1次と2次モードでは付加質量なしと同様の変形を示したが、3次モードにおいては面内圧縮変形、4次モードにお

いては面外曲げ変形が起きていることが確認された。各付加質量の条件における 1 次から 5 次モードにおける固有周波数を Table 4. 2 に示す。付加質量を増加させていくと固有周波数が低くなっていく傾向にあることが分かった。FE 解析から得られた 1 次モードにおける固有周波数は付加質量 0.2 g, 付加質量 0.07 g, 付加質量なしにおいてそれぞれ 11 Hz, 20 Hz, 154 Hz であった。これは実験結果における面外曲げ変形方向における第一固有周波数の, 12 Hz, 22 Hz, 152 Hz と非常に類似した結果を得た。また, 2 次モードにおける FE 解析の結果は, 付加質量 0.2 g が 40 Hz, 付加質量 0.07 g が 70 Hz, 付加質量なしが 369 Hz であった。実験結果における面内せん断変形方向における第一固有周波数である 44 Hz, 86 Hz, 350 Hz であり, 変形方向と固有周波数が類似していたことが確認された。

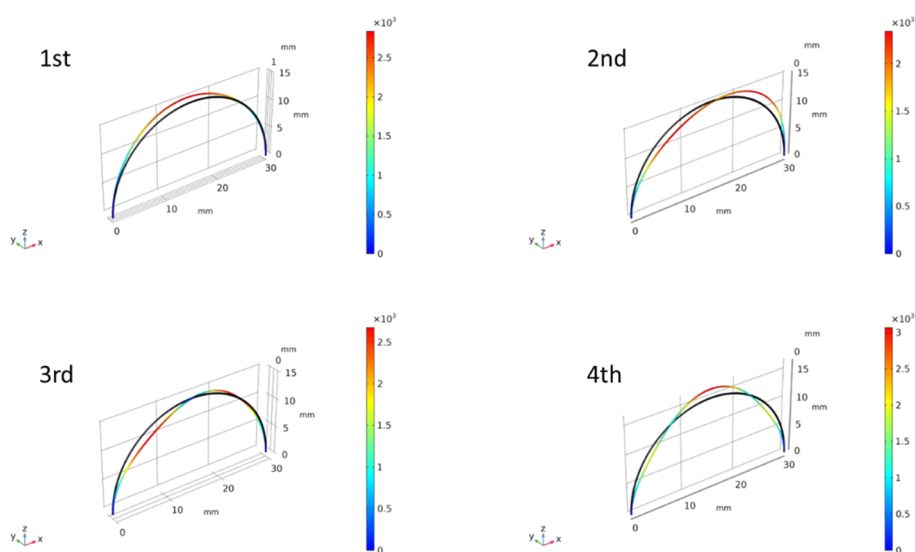


Fig. 4.6 Natural vibration analysis results of the R15 accelerometer with no weight by FE analysis [34].

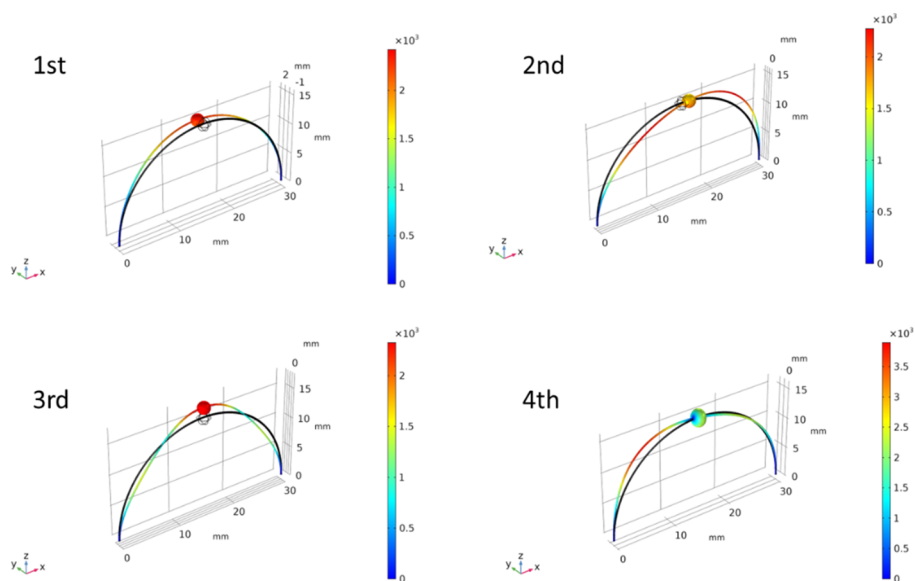


Fig. 4.7 Natural vibration analysis results of the R15 accelerometer with 0.07 g

weight by FE analysis [34].

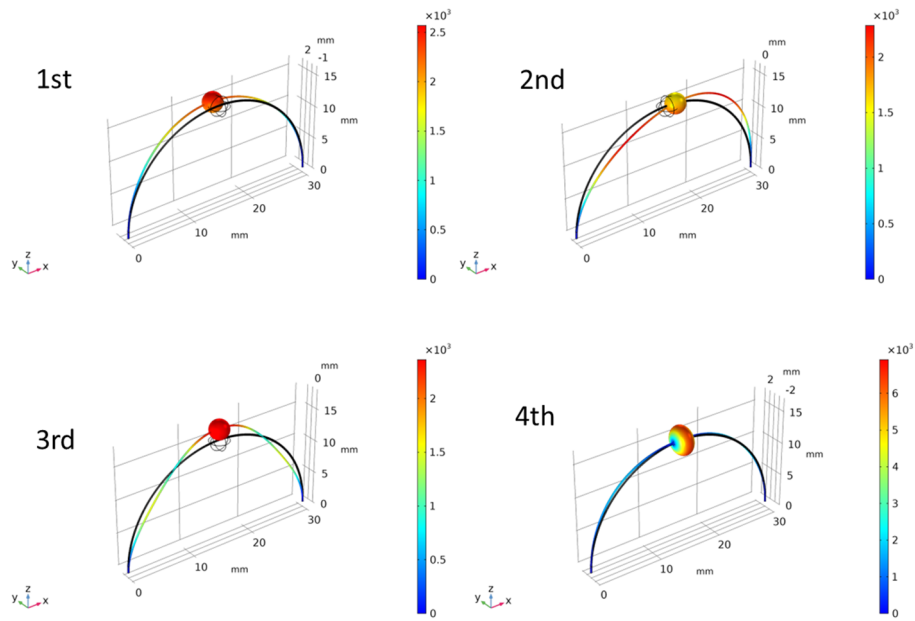


Fig. 4.8 Natural vibration analysis results of the R15 accelerometer with 0.2 g weight by FE analysis [34].

Table 4.2 FE analysis results of the natural frequency of accelerometer with weight from 1st to 5th modes [34].

Weight [g]	1st [Hz]	2nd [Hz]	3rd [Hz]	4th [Hz]	5th [Hz]
0.2	11	40	62	140	189
0.07	20	70	102	338	345
No weight	154	369	443	814	927

Fig. 4.9 に提案光ファイバ加速度計の面内せん断変形方向における FE 解析によって得られた周波数応答特性と、実験結果から得られた 1 g あたりの光損失量を 3.3 で示した強制変位特性を用いて 1 g あたりのヘテロコア部における変位量に換算したものを示す。FE 解析の結果では、実験で得られた周波数応答と同様なスペクトルを示し、共振周波数以下で感度が安定していることが確認された。実験結果から得られた共振周波数の 4 分の 1 以下における感度の平均を評価した。それぞれの付加

質量の条件による評価するための周波数範囲は、付加質量 0.2 g では 2–10 Hz, 付加質量 0.07 g では 2–22 Hz, 付加質量なしでは 2–86 Hz である。また、付加質量の違いによる共振周波数と感度の関係を Fig. 4.10 に示す。FE 解析と実験から得られた感度はそれぞれ、付加質量が重くなるにつれて高くなっているのが確認された。また、FE 解析から得られた感度は実験で得られた感度に近い値が得られたが、完全に一致はしなかった。これは、3.4.2 でも述べたように、ヘテロコア部においては一度被覆を剥がした後に融着し、リコートしていることから、一様になっていない可能性や、もとの被覆とはことなるヤング率、密度の紫外線硬化樹脂が用いられている可能性があるため、それらの影響を受けていることが考えられる。しかし、付加質量の条件の違いによる感度の傾向は良好な一致を示していることから、作製されたヘテロコア光ファイバ加速度計が FE 解析モデルに基づいていることが確認された[34]。

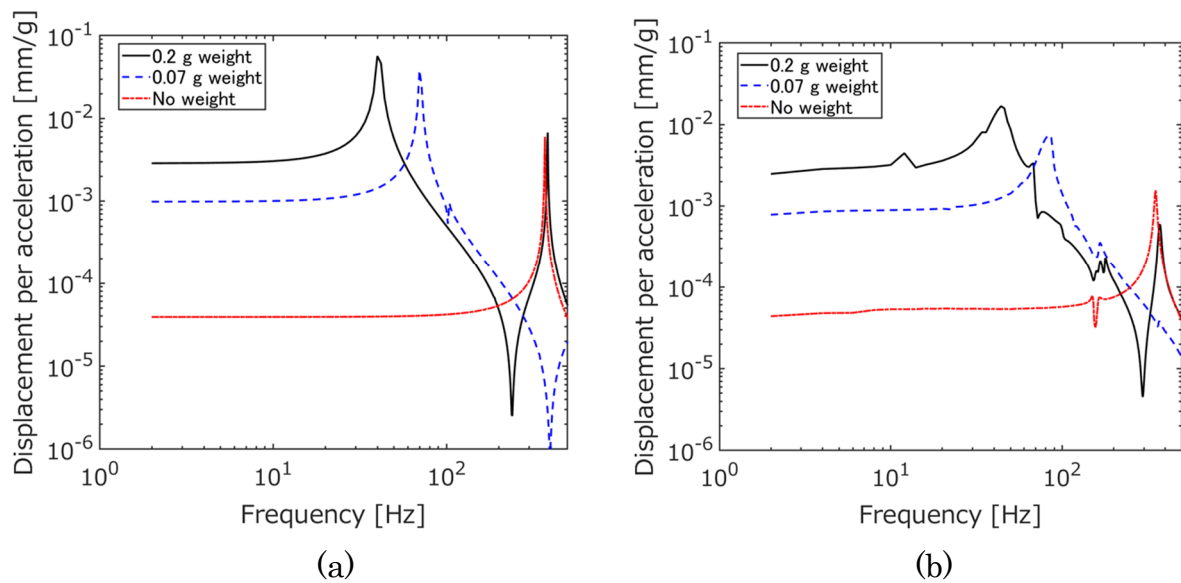


Fig. 4.9 Frequency response characteristics of the displacement for different weight subjected to in-plane shear deformation vibration: (a) FE analysis and (b) experimental results [34].

Table 4.3 Average sensitivity obtained from FE analysis results and experimental results in the measurable range frequency band [34].

	FE analysis	Experimental results
Weight [g]	Sensitivity [mm/g]	Sensitivity [mm/g]
0.2	2.9×10^{-3}	2.9×10^{-3}
0.07	1.0×10^{-3}	8.9×10^{-4}
No weight	4.0×10^{-5}	5.4×10^{-5}

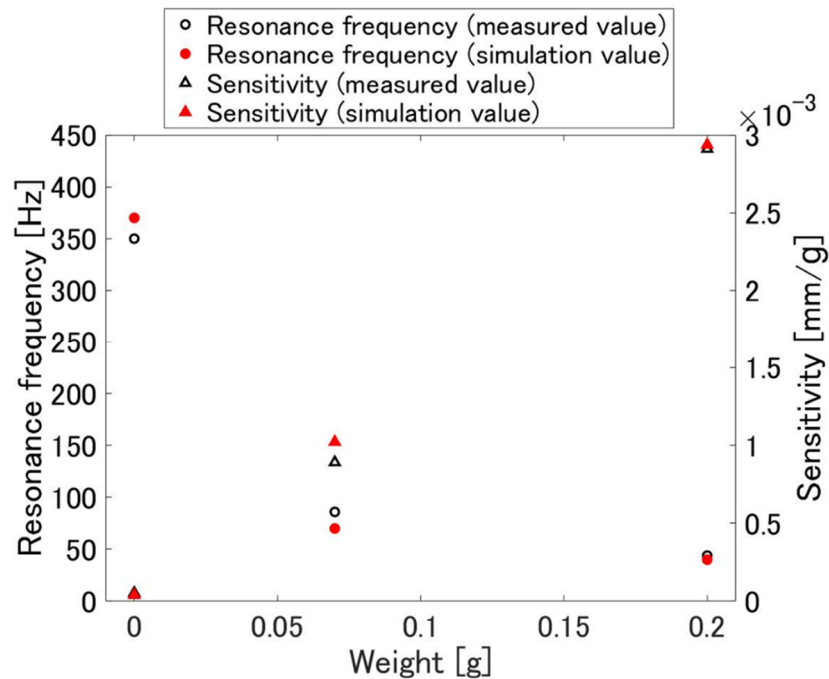


Fig. 4.10 Resonance frequency and average sensitivity function for different weights obtained from FE analysis and experimental results [34].

4.5 結言

本章では、大型構造物モニタリングのために低周波領域における感度向上を目的とし、半円型の両端固定支持梁構造へテロコア光ファイバ加速度計に質量を付加した構成のセンサを提案し、付加質量の違いによる周波数応答特性を実験的に明らかにし、面内せん断変形方向と面外曲げ変形方向における横感度に関して評価を行った。その結果、どの付加質量の条件であっても面外曲げ変形方向よりも面内せん断変形方向の感度が高いことが確認され、振動の印加方向に感度差が生じているため、質量を付加した場合の提案光ファイバ加速度計においても3軸加速度計への拡張も可能であると考えられる。また、感度の高い面内せん断変形方向における0.2 gの質量を付加した提案光ファイバ加速度計は、従来の振り子型テロコア光ファイバ加速度計と比較すると感度は約3.3倍向上した。さらに、提案する光ファイバ加速度計の構造解析のために作成したモデルによるFE解析の結果、付加質量が増加すると固有周波数が低くなるため測定可能範囲は狭くなり、感度が向上することが確認され、被覆にはセカンダリ層を参考にしたパラメータを用いることで、付加質量の違いによる実験結果とFE解析による固有周波数及び感度の傾向は一致していた。

第 5 章 センサの時間応答周波数の違いに着目したマルチモーダル計測への応用

5.1 緒言

本章では、コストパフォーマンスが高い光強度ベースで計測可能なヘテロコア光ファイバセンサをファイバ 1 ライン上に検出対象の異なる複数のセンサをタンデムに接続し、同時検出するマルチモーダル計測手法について提案する。ヘテロコア光ファイバセンサは光強度ベースで光損失値として計測されているため、1 ライン上に設置されたセンサの応答の積算された光損失変化が生じる。そのため、時間応答の信号では情報の識別が困難である。そこで、センサの時間応答周波数の違いに着目し、周波数フィルタを用いることで情報識別が可能であるかを実験的に確認した。

5.2 センサ構成

本実験では、Fig. 5.1 に示すようなこれまでに提案してきたコア径 $9\ \mu\text{m}$ のシングルモード伝送路ファイバにコア径 $3\ \mu\text{m}$ 、挿入長 $1\ \text{mm}$ のシングルモードファイバ挿入・融着した 9-3-9 型ヘテロコア光ファイバを用いた曲率半径 R が $15\ \text{mm}$ の加速度計を用いた。加速度計は事前に振幅応答特性を取得し、 $40\ \text{Hz}$ における感度を計測し、 $6.1 \times 10^{-3}\ \text{dB/g}$ であることが分かっている。また、液体検知のためのヘテロコア光ファイバセンサには、Fig. 5.2 に示すように、加速度計同様、伝送路にコア径 $9\ \mu\text{m}$ のシングルモードファイバとヘテロコア部にコアが存在しないソノコアファイバ、挿入長 $9 - 9.1\ \text{mm}$ とした 9-0-9 型のものを用いた。9-0-9 型のヘテロコア光ファイバの挿入長は、実験で用いる光源の中心波長が $1.31\ \mu\text{m}$ で感度が最大になるように調整されている。水素を検知する実験においては、水素に反応する感受性膜を成膜する必要があるため、本実験では、パラジウムナノ粒子を成膜した 9-0-3 型ヘテロコア光ファイバセンサを使用した。

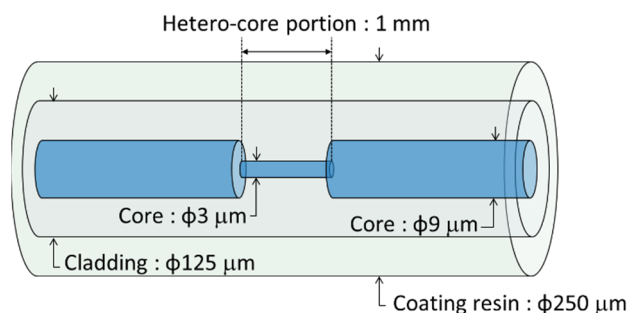


Fig. 5.1 Configuration of the hetero-core structures for accelerometer.

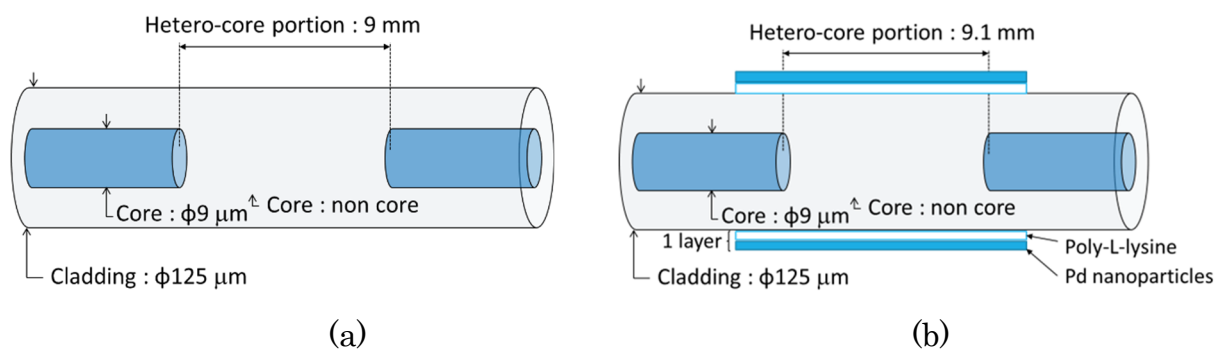


Fig. 5.2 Configuration of the hetero-core structures for (a) liquid detection sensor and (b) hydrogen sensor.

5.3 複数点のセンサ応答情報識別手法

本実験では、センサが感知する時間応答周波数が明らかに異なる 2 種類を検知対象とした。比較的 時間応答周波数が低い検知対象は液体(純水)と水素、比較的 時間応答周波数が高い検知対象は振動(10 – 90 Hz)とした。振動と液体または水素を同時に検出する際には、光ファイバ 1 ライン上にこの 2 種類のセンサをタンデムに接続するため、計測の際には両者の情報を含んだ光損失値が取得される。Fig. 5.3 に時間応答周波数が低い検知対象物と時間応答周波数が高い検知対象物をタンデムに接続し、二つの情報を同時に取得した場合に得られると考えられる光損失応答を示す。このように取得された光損失値に対して、時間応答周波数が低いものに対してはローパスフィルタを、時間応答周波数が高いものに対してはハイパスフィルタまたはバンドパスフィルタを施すことで 2 種類の情報を区別できると考えられる。

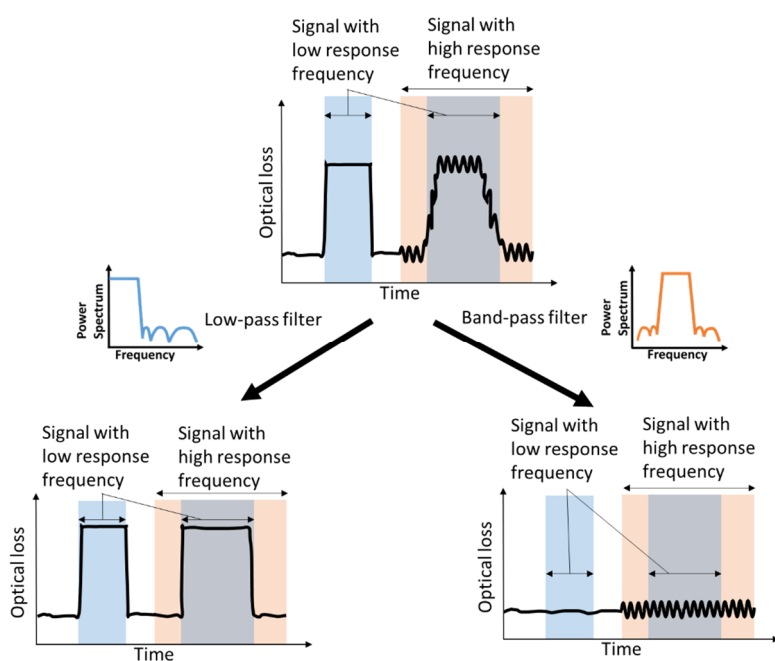


Fig. 5.3 Information differentiation method by applying a frequency filter.

5.4 LD 光源を用いたマルチモーダル計測

Fig. 5.4 に LD 光源を用いた加速度と液体付着検知のための実験構成を示す. ヘテロコア光ファイバ加速度計と参照用加速度計は加振器に取り付けられた台に設置し, ヘテロコア光ファイバ液体付着検知センサはセンサ部付近の両端をクランプで固定し設置した. 実験条件は①計測開始後 20 秒後にヘテロコア光ファイバ液体付着センサを 20 秒純水に浸し, ②ヘテロコア光ファイバ液体付着センサから純水を取り除いた. さらに①と②の手順を繰り返した後に, 計測開始後 100 秒後には, 40 Hz の正弦波振動を加振器によってヘテロコア光ファイバ加速度計と参照用加速度計に印加した. その後①と②の手順をさらに 2 回繰り返した.

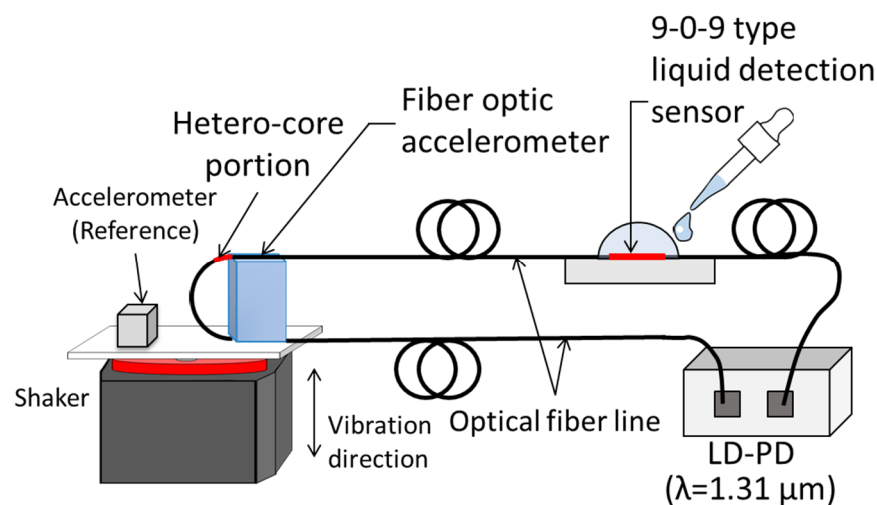


Fig. 5.4 Experimental configuration for detecting liquid adhesion and acceleration.

Fig. 5.5 に液体付着センサと加速度計の光損失時間応答を示す. 0 – 20 秒において, 0 dB を基準に光損失に 0.05 dB の変動幅が見られるが, これはセンサの初期損失を含めた計測構成自体のノイズであると考えられる. 液体付着センサに純水を浸した際に, 光損失が 0.2 ± 0.025 dB 程度の大きな変化が生じていることが確認された. しかしながら, 計測開始 100 秒後に振動を印加してからは, 純水を浸しているタイミングでは 0.2 dB を基準に, 振動を印加していない時に比べて光損失の変動幅が ± 0.05 dB と大きくなっていることが確認された. Fig. 5.6 に 5 Hz をカットオフ周波数としたローパスフィルタを施した時間応答を示す. ローパスフィルタを施した信号では, 加振時においても, 加振していない応答の時と同様な応答を示していることが確認され, 液体付着の信号成分だけ抽出できた. 純水を浸したタイミングもしくは取り除いたタイミングで大きな光損失変化が生じているが, これは液体付着センサに純水を浸したり取り除くときに液体の表面張力によりファイバに局所的な曲げが生じたためだと考えられる. Fig. 5.7 に 10 – 90 Hz のバンドパスフィルタを施した時間応答を示す. 加速度が印加されていない範囲で純水を浸した時に生じていた 0.2 dB 程度の光損失変化の信号が除去されていた. 加振時のみ

の 105 – 105.1 秒における応答と加振に加え液体付着させた時の 125 – 125.1 秒における応答に着目すると、どちらの場合においても光ファイバの応答は参照用加速度計と同様な正弦波応答を示していた。また、光損失から加速度に換算した結果、同様な加速度値を示していたことが確認された。そのため、バンドパスフィルタを施したことによって加速度のみの信号を抽出することに成功した。以上の結果より、周波数フィルタを施すことにより、時間応答周波数が低い液体付着検知と時間応答周波数が高い加速度の検知を同時に行い、それぞれの信号を抽出可能であることを示した。

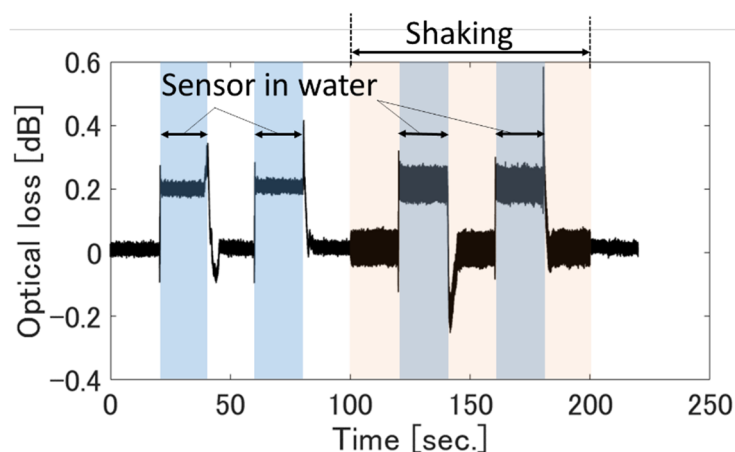


Fig. 5.5 Real time response of the hetero-core optical fiber liquid adhesion and acceleration sensor.

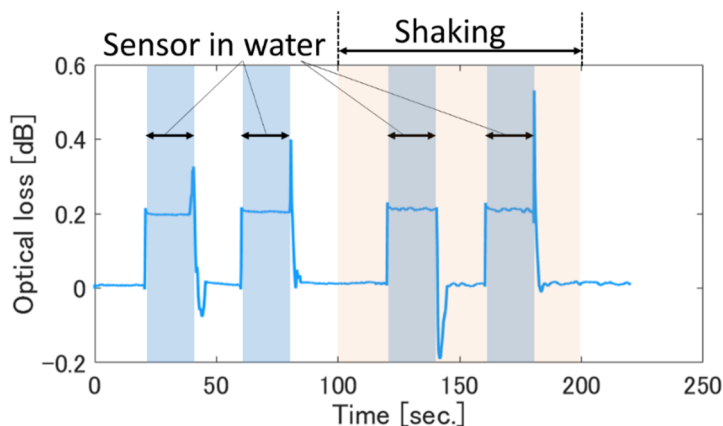


Fig. 5.6 Real time response of a low-pass filtered optical fiber sensor.

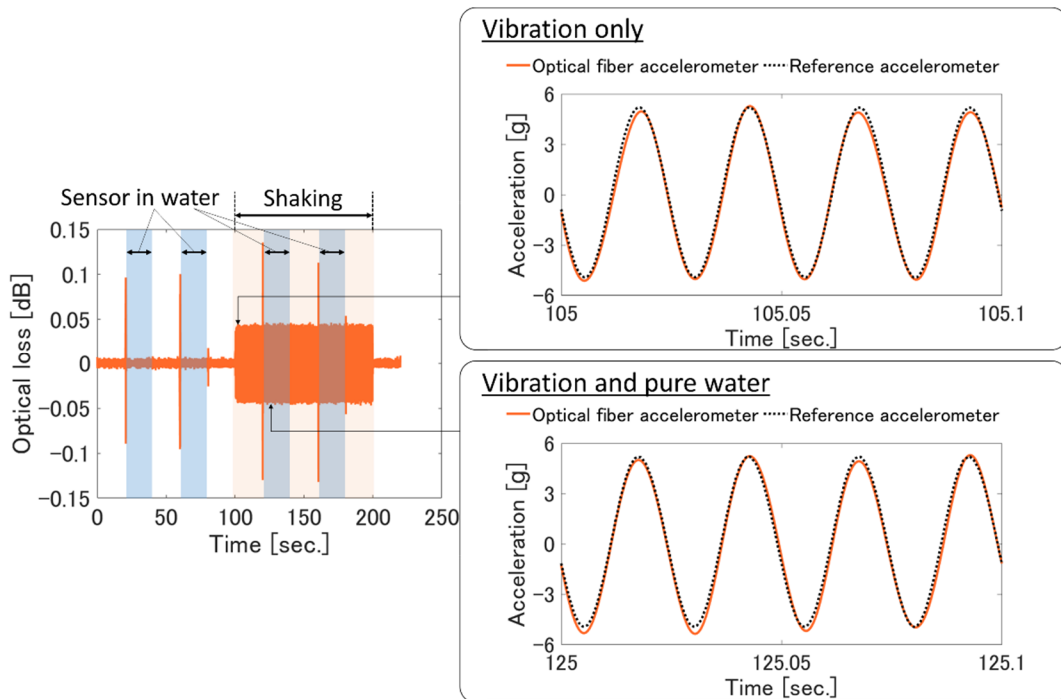


Fig. 5.7 Real time response of a band-pass filtered optical fiber sensor.

5.5 LED 光源を用いたマルチモーダル計測

Fig. 5.8 に LED 光源を用いた加速度と水素検知のための実験構成を示す. ヘテロコア光ファイバ加速度計と参照用加速度計は 5.4 と同様に加振器に取り付けられた台に設置し, ヘテロコア光ファイバ水素センサはセンサ部をガスチャンバー内にたわみがないように設置した. 実験条件は①計測開始約 15 秒後に 40 Hz の正弦波振動を加振し, ②計測開始約 50 秒後に水素 4% のガスを 60 秒ガスチャンバーに流入, ③その後窒素ガスを 120 秒ガスチャンバーに流入し, ②と③をさらに 1 回ずつ繰り返した.

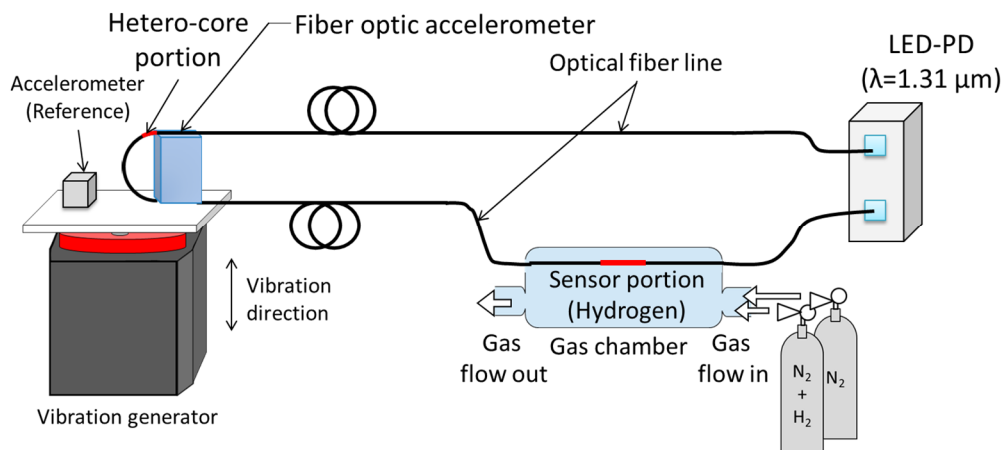


Fig. 5.8 Experimental configuration for detecting hydrogen and acceleration.

Fig. 5.9 に水素センサと加速度計の光損失時間応答を示す。0 – 15 秒で光損失変化の振幅が 0.1 dB あった。5.4 でも示したように、この変動幅はセンサの初期損失と計測器自体のノイズであると考えられるが、LD を用いた時よりも変動幅が明らかに大きくなっているのは、光源に LED を用いているため、受光部における光量が LD を用いた時より減少したことによって、ノイズレベルが上昇したと考えられる。Fig. 5.10 と Fig. 5.11 に 10 – 80 Hz のバンドパスフィルタ、5 Hz をカットオフ周波数としたローパスフィルタを施した時間応答を示す。バンドパスフィルタを施した信号においては、参照用加速度計と同様な 40 Hz の正弦波振動の応答を示し、ローパスフィルタを施した信号においては、水素ガスをガスチャンバー内に流入した際に約 0.13 dB 程度の光損失変化が生じていることが確認され、5.4 と同様に周波数フィルタを用いることで水素と加速度の信号を分離することに成功した。しかし、バンドパスフィルタを施した加速度の信号に着目すると、振幅値においては安定しておらず、大きな誤差が生じている。これは、9-3-9 型ヘテロコア光ファイバセンサと 9-0-9 型ヘテロコア光ファイバセンサの挿入損失が大きく、さらに二つのセンサをタンデムに接続したことにより LED 光源では初期電圧が低いため、S/N 比が低下したことが影響していると考えられる。そのため、ヘテロコア光ファイバセンサを用いたマルチモーダル計測においては、光源に LD を用いるか挿入損失が低いヘテロコア構造を用いることで精度が担保されると考えられる。

5.6 結言

本章では、ヘテロコア光ファイバセンサを用いたマルチモーダル計測への応用のために、光ファイバ 1 ライン上に時間応答周波数の異なる 2 種類のセンサを設置し、得られた時間応答から周波数フィルタを施す手法の提案を行った。実験では、時間応答周波数の低い液体付着または水素検知と時間応答周波数の高い加速度を検知するためのセンサを光ファイバ 1 ライン上に設置した状態で計測を行い、周波数フィルタを施すことでそれぞれの信号を抽出することに成功した。そのため、時間的に分離がしやすい異種のセンサにおいては信号を分離することが可能であり、加速度や液体検知だけでなく、幅広い種類のセンサに対しても応用が可能であり、マルチモーダルに適応できると考えられる。例えば、今回は時間応答が比較的遅いセンシング対象を液体検知としたが、ガス検知のようなものにも適応が期待できる。しかし、本研究で用いた 9-3-9 型と 9-0-9 型ヘテロコア光ファイバセンサは挿入損失が高く、2 点接続したことにより S/N 比が低下し、LED 光源を用いた計測では、バンドパスフィルタを施した信号において加速度振幅に対する光損失値の変化幅が安定していないことが確認された。そのため、ヘテロコア光ファイバセンサを用いたマルチモーダル計測においては、S/N 比が低下しないように挿入損失を抑える必要があることが分かった。また、3 点以上センサを設置する際には、挿入損失だけでなく、フィルタの設計にも工夫が必要であるため、今後検討する必要がある。

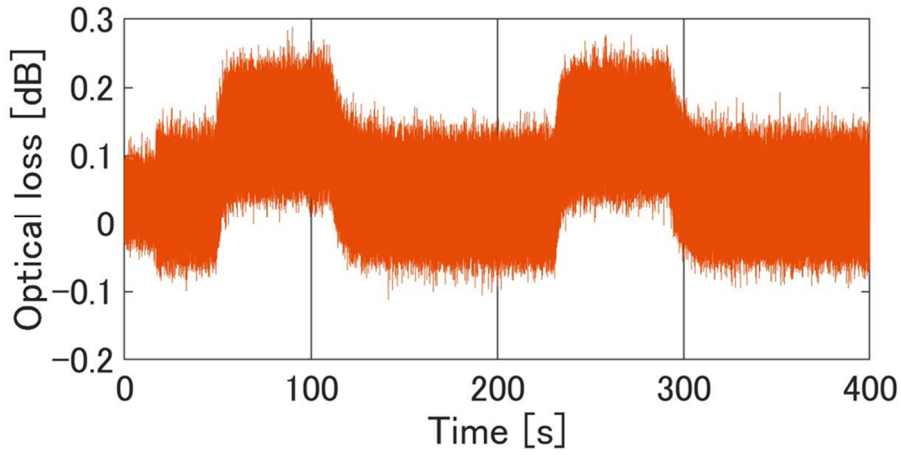


Fig. 5.9 Real time response of the hetero-core optical fiber hydrogen and acceleration sensor.

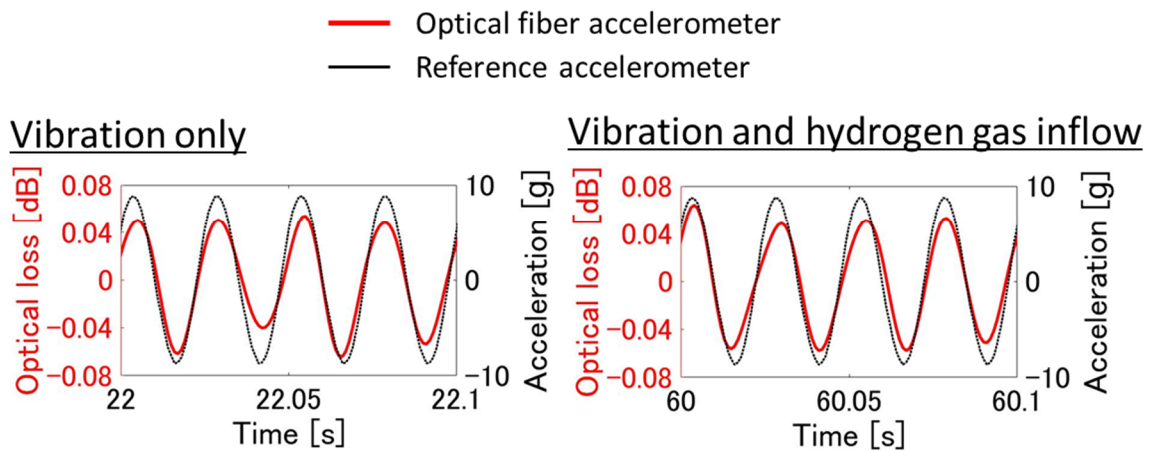


Fig. 5.10 Real time response of a band-pass filtered optical fiber sensor.

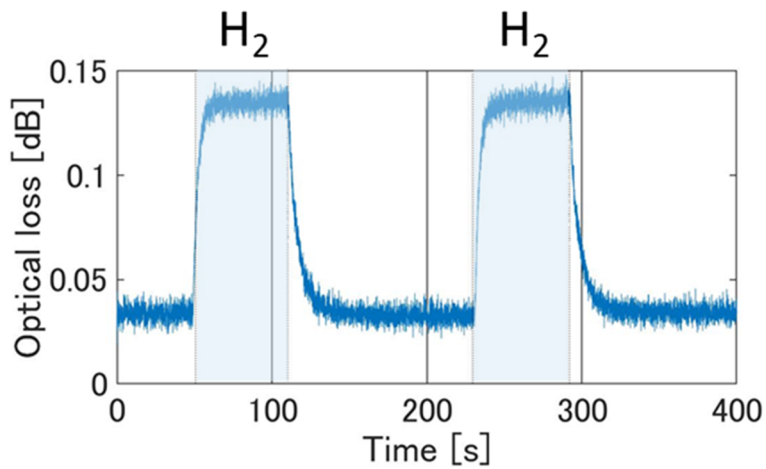


Fig. 5.11 Real time response of a low-pass filtered optical fiber sensor.

第 6 章 結論

本論文では、コストパフォーマンスの高いヘテロコア光ファイバセンサを用いた、ファイバの剛性を利用したシンプルな構成の横感度の低い加速度計の提案を行い、実験的に加速度計としての性能評価を行い、3 軸加速度計としての実用化のための手法を確立した。以下に得られた結果と結論をまとめる。

第 2 章においては、回転機器の異常診断や大型構造物ヘルスマニタリングに用いられる加速度計の具体例として電気式と光ファイバ式のセンサ技術について紹介した。

第 3 章では、ヘテロコア光ファイバを用いた半円型の両端固定支持梁構造の構造、特徴、原理、を述べた後に、加速度計としての基本的な特性である周波数応答特性、加速度振幅応答特性、作製された加速度計のシミュレーションとの整合性、横感度、3 軸加速度計としての性能を記述した。3 軸加速度計を実現のために、ヘテロコア部をファイバ半円の固定端に設置することで横感度の低い加速度計を提案した。強制変位特性実験により、変形方向によってヘテロコア部における変位に対して感度差が生じており面内せん断変形方向に最も高い感度を有していることを明らかにし、印加した変位に対して十分な線形性があることを示した。また、曲率半径の異なる加速度計を作製し、周波数応答特性実験と加速度振幅応答特性実験、FE 解析を行い、曲率半径が小さくなるほど共振周波数が高くなるため、計測可能な周波数範囲が広くなり、感度と計測可能周波数範囲にトレードオフの関係があり、計測対象に合わせて調整が可能であることを示した。また、これらの動的特性においても加速度印加方向に対して感度差が生じ、強制変位特性同様に面内せん断変形方向に最も高い感度を有し、横感度の低い加速度計としての性能が明らかになった。また、横感度が低いといった特徴を活かし、3 軸加速度計の提案を行い、構成、計測システムについて記述した。半円のファイバが直交するように 3 本の加速度計を立方体の筐体に設置した。横感度が 5%以上あったため、横感度の影響を考慮する必要があった。そこで、本研究では 3×3 感度マトリクスを適用し、補正を行った。3 軸加速度計の性能評価実験では、主軸感度のみで光損失から加速度に換算したものと、3×3 感度マトリクスを用いて光損失から加速度に補正したものを比較したところ、各軸における最大相対誤差は主軸感度の換算では 88.3%、3×3 感度マトリクスによる補正では 20.2%であった。また、3 軸の合成加速度における最大相対誤差は 20.2%と 6.97%であり、3×3 感度マトリクスを用いることで大幅に相対誤差が抑えられていることが示された。

第 4 章では、大型構造物モニタリングを対象とし、低周波領域における感度向上を目指し、第 3 章で提案した加速度計に半円の中心に質量を付加した構成のセンサを提案し、周波数応答特性と横感度について記述した。これらの結果から、付加質量の重さを大きくしていくと、感度が向上し共振周波数が低くなるため、付加質量の重さに対して感度と測定可能周波数範囲にトレードオフの関係があることが示された。また、質量を付加しても低い横感度を維持していることが確認された。結果として、従来の振り子型ヘテロコア光ファイバ加速度計と比較すると感度は約 3.3 倍向上し、シンプルな構成で低周波領域において感度の向上に成功した。また、FE 解析においては、物性値が明らかにならなかった被覆のパラメータを、先行研究で示されていたセカンダリ層を適応することで実験結果と良好な結果を得られた。

第 5 章では、これまでに提案した時間応答周波数の高いヘテロコア光ファイバ加速度計に加え、時間応答周波数の低い液体付着検知のためのセンサや水素センサと組み合わせ、ファイバ 1 ライン上でのマルチモーダル計測への応用のための手法を示し、実験的にセンサ情報を分離可能であるか検証した。時間応答周波数の違いに着目し、時間応答周波数の高い信号に対してはバンドパスフィルタ、

時間応答周波数の低いセンサに対してはローパスフィルタを施すことで、それぞれの信号を抽出でき、加速度と液体付着または水素の検知が可能であり、様々なセンシングが可能なヘテロコア光ファイバのマルチモーダル計測への応用が可能であることが示された。センサ点数を増やす際には、ファイバ 1 ライン上における S/N 比の低下が懸念されるため、今後 S/N 比の低下を抑える方法について検討する必要があることも実験結果から示された。

結論として本研究では、コストパフォーマンスが高い LED による光強度測定のみで動作するヘテロコア光ファイバ曲げ歪センサを、本来はその軸感度対称構造のために、曲げ感度の方向検知性能の無い特性に、変形検知の異方性を持たせることに成功し、加速度計として必須の性能である低い横感度を、光ファイバのみの構成で実現した。更に、実用的な仕様の観点から、加速度計の精度低下の要因を実験的に明らかにし、位相特性から、光ファイバ構造のコーティングによる粘弾性の影響も明らかにし、本論文では半円状光ファイバの面の傾きの製造誤差による精度低下とその改善案も明らかにした。光ファイバのみの最も簡素な構成での加速度計において、設計の指針を明らかにし、実用的な観点での性能を実験的に実施したことは社会実装の可能性を大きく開いた。

参考文献

- [1] R. Yan and R. X. Gao, "Energy-based feature extraction for defect diagnosis in rotary machines," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 9, pp. 3130–3139, 2009.
- [2] B. Djaidir, A. Hafaifa, and A. Kouzou, "Faults detection in gas turbine rotor using vibration analysis under varying conditions," *J. Theor. Appl. Mech.*, vol. 55, no. 2, pp. 393–406, 2017.
- [3] F. Ksica, A. Hadas, and J. Hinka, "Integration and test of piezocomposite sensors for structure health monitoring in aerospace," *Measurement*, Vol.147, p. 106861, 2019.
- [4] S. Das, and P. Saha, "A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures," *Measurement*, Vol. 129, pp. 68-90, 2018.
- [5] S. Baba, and J. Kondoh, "Damage evaluation of fixed beams at both ends for bridge health monitoring using a combination of a vibration sensor and a surface acoustic wave device," *Eng. Struct.*, Vol. 262, p. 114323, 2022.
- [6] P. J. Ellerbrack, "DC-XA structural health-monitoring fiber optic-based strain measurement system," in *Proc. SPIE*, vol. 3044, pp. 207–218, 1997.
- [7] A. Utz, S. Walk, A. Stanitzki, M. Mokhtari, M. Kraft, and R. Kokoziński, "A high-precision and high-bandwidth MEMS-based capacitive accelerometer," *IEEE Sens. J.*, Vol. 18, No. 16, pp. 6533–3539, 2018.
- [8] S. Trivedi, T. Shen, C. Y. Chang, P. W. Huang, and S. S. Li, "Design of piezoelectric MEMS accelerometer module and its application in surface roughness prediction of fused silica substrate," *IEEE Sens. J.*, Vol. 21, No. 19, pp. 21979–21988, 2021.
- [9] H. Wang, B. Yan, and L. Liang, "A 3D FBG accelerometer based on two pairs of flexible hinges," *IEEE Sens. J.*, Vol. 21, No. 19, pp.21586-21593, 2021.
- [10] F. Zhang, S. Jiang, C. Wang, J. Ni, and Q. Zhao, "Broadband and high sensitivity FBG accelerometer based on double diaphragms and h-shaped hinges," *IEEE Sens. J.*, Vol. 21, No. 1, pp. 353-359, 2021.
- [11] J. M. Corres, J. Bravo, F. J. Arregui, and I. R. Matias, "Vibration monitoring in electrical engines using an in-line fiber etalon," *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 132, No. 2, pp. 506–515, 2006.
- [12] Y. Li, Q. Ma, F. Chen, R. Wang, and X. Qiao, "A flexible hinge accelerometer based on dual short fiber bragg grating," *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 334, No. 1, p. 113695, 2022.
- [13] W. Chung, and D. Kang, "Full-scale test of a concrete box girder using FBG sensing system," *Eng. Struct.*, Vol. 30, No. 3, pp. 643–652, 2008.
- [14] Q. Jiang, and M. Yang, "Simulation and experimental study of a three-axis fiber Bragg grating accelerometer based on the pull-push mechanism," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 11, 2013, Art. No. 115105.

- [15] M. Mahissi, X. Tong, C. Zhang, C. Deng, J. Wei, and S. Chen, "Study on the vibration performances for a high temperature fiber F-P accelerometer," *Opt. Fiber Technol.*, Vol. 62, 2021, Art. No. 102471.
- [16] A. Cusano, A. Cutolo, J. Nasser, M. Giordano, and A. Calabro, "Dynamic strain measurements by fibre Bragg grating sensor," *Sensors and actuators A: physical*, Vol 110, No. 1-3, pp. 276-281, 2004.
- [17] A. Fender, W. N. MacPherson, R. R. J. Maier et al., "Two-axis temperature-insensitive accelerometer based on multicore fiber Bragg Gratings," *IEEE Sens. J.*, Vol. 8, No. 7, pp. 1292–1298, 2008.
- [18] L. Xiong, Y. Guo, W. Zhou, M. Chen, and X. Zhou, "Fiber Bragg grating based three-axis vibration sensor," *IEEE Sens. J.*, Vol. 21, No. 22, pp. 25749–25757, 2021.
- [19] N. Basumallick, I. Chatterjee, P. Biswas, K. Dasgupta, and S. Bandyopadhyay, "Fiber Bragg grating accelerometer with enhanced sensitivity," *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 173, No. 1, pp. 108–115, 2012.
- [20] A. Kersey et al., "Fiber grating sensors," *J. Lightw. Technol.*, Vol. 15, No. 8, pp. 1442–1463, 1997.
- [21] L. Qiu, L. Liang, D. Li, and G. Xu, "Theoretical and experimental study on FBG accelerometer based multi-flexible hinge mechanism," *Optical Fiber Technology*, Vo. 38, pp. 142-146, 2017.
- [22] Z. Qu, P. Lu, W. Zhang, W. Xiong, D. Liu, and J. Zhang, "Miniature tri-axis accelerometer based on fiber optic Fabry-Pérot interferometer," *Opt. Express*, Vol. 30, No. 13, pp. 23227–23237, 2022.
- [23] S. Wu, L. Wang, X. Chen, and B. Zhou, "Flexible optical fiber Fabry-Perot interferometer based acoustic and mechanical vibration sensor," *J. Lightw. Technol.*, Vol. 36, No. 11, pp. 2216–2221, 2018.
- [24] H. Ouyang, Z. Qu, H. Liu, H. Hu, S. Yan, Y. Wang, and L. Tu, "Nano-g accelerometer with differential Fabry-Pérot interferometer for-low-frequency noise suppression," *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 346, p. 113874, 2022.
- [25] M. Nishiyama, H. Sasaki, and K. Watanabe, "A deformation sensitive pad-structure embedded with hetero-core optic fiber sensors," *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 136, pp. 205–211, 2007.
- [26] Y. Koyama, M. Nishiyama, and K. Watanabe, "Smart textile using hetero-core optical fiber for heartbeat and respiration monitoring," *IEEE Sens. J.*, Vol. 18, No. 15, pp. 6175–6180, 2018.
- [27] H. Yamazaki, I. Kurose, M. Nishiyama, and K. Watanabe, "Pendulum-type hetero-core fiber optic accelerometer for low-frequency vibration monitoring," *Sensors*, Vol. 18, No. 8, p. 2528, 2018.

- [28] M. Nishiyama, and K. Watanabe, “Frequency characteristics of hetero-core fiber optics sensor for mechanical vibration,” *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 209, pp. 154–160, 2014.
- [29] M. Kadokura, H. Yamazaki, M. Nishiyama, and K. Watanabe, “Frequency characteristics of hetero-core fiber accelerometer with two orthogonal vibrational modes of an arch shape beam structure,” in *Proc. IEEE SENSORS*, Rotterdam, The Netherlands, 2020, pp. 1–4.
- [30] A. Matsuo, M. Kadokura, H. Yamazaki, M. Nishiyama, and K. Watanabe, “Cantilever type accelerometer based on a mirror-terminated hetero-core optical fiber,” *IEEE Sens. J.*, Vol. 21, No. 20, pp. 22464–22471, 2021.
- [31] M. Kadokura, H. Yamazaki, T. Kasai, K. Watanabe, and M. Nishiyama, “Sensitivity enhancement of a semicircular hetero-core optical fiber accelerometer with low cross-axis sensitivity,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 71, 2022, to be published. DOI: 10.1109/TIM.2021.3132074.
- [32] M. Kadokura, H. Yamazaki, T. Kasai, K. Watanabe, and M. Nishiyama, “Triaxial accelerometer based on a semicircular hetero-core fiber-optic sensor,” *IEEE Sensors Journal*. (Accepted)
- [33] 門倉美幸, 渡辺一弘, 西山道子, “低周波振動モニタリングのための両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の周波数および横感度特性評価,” *センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム*, 2022.
- [34] 門倉美幸, 山崎大志, 葛西時雄, 渡辺一弘, 西山道子, “低周波振動モニタリングのための両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計,” *電気学会論文誌 E*. (査読中)
- [35] M. Kadokura, K. Suzuki, H. Yamazaki, M. Nishiyama, and K. Watanabe, “Frequency characteristics of hetero-core fiber accelerometer with two orthogonal vibrational modes of an arch shape beam structure,” *IEEE The International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Conference Open poster, 2022.
- [36] Y. Yang, Y. Zhang, and X. Tan, “Review on vibration-based structural health monitoring techniques and technical codes,” *symmetry*, Vol. 13, No. 11, p. 1998, 2021.
- [37] G. Betta, C. Liguori, A. Paolillo, and A. Pietrosanto, “A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 51, No. 6, pp. 1316-1322, 2002.
- [38] S. Komarizadehasl, F. Lozano, J. A. Lozano-Galant, G. Ramos, and J. Turmo, “Low-cost wireless structural health monitoring of bridges,” *sensors*, Vol. 22, No. 15, p. 5725, 2022.
- [39] A. Sabato, M. Q. Feng, Y. Fukuda, D. L. Carní, and G. Fortino, “A novel wireless accelerometer board for measuring low-frequency and low-amplitude structural vibration,” *IEEE Sens. J.*, Vol. 16, No. 9, pp. 2942-2949, 2016.

- [40] S. Gao, F. Shang, and C. Du, "Design of multichannel and multihop low-power wide-area network for aircraft vibration monitoring," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 68, No. 12, pp. 4887-4895, 2019.
- [41] A. Mustafazade, M. Pandit, C. Zhao, G. Sobreviela, Z. Du, P. Steinmann, X. Zou, R. T. Howe, and A. A. Seshia, "A vibrating beam MEMS accelerometer for gravity and seismic measurements," *Sci. Rep.*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-8, 2020.
- [42] W. Niu, L. Fang, L. Xu, X. Li, R. Huo, D. Guo, and Z. Qi, "Summary of research status and application of MEMS accelerometers," *Journal of Computer and Communications*, Vol. 6, No. 12, pp. 215-221, 2018.
- [43] K. S. Lim, M. K. A. Zaini, Z. C. Ong, F. Z. M. Abas, M. A. B. M. Salim, and H. Ahmad, "Vibration mode analysis for a suspension bridge by using low-frequency cantilever-based FBG accelerometer array," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 70, pp. 1-8, 2021, Art no. 7000908.
- [44] S. Kavitha, R. J. Daniel, and K. Sumangala, "High performance MEMS accelerometers for concrete SHM applications and comparison with COTS accelerometers," *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 66, pp. 410-424, 2015.
- [45] Online. https://www.analog.com/media/jp/technical-documentation/application-notes/anj-0005_jp.pdf
- [46] J. Martinez, D. Asiain, and J. R. Beltrán, "Lightweight thermal compensation technique for MEMS capacitive accelerometer oriented to quasi-static measurements," *sensors*, Vol. 21, No. 9, p. 3117, 2021.
- [47] Y. C. Chen, C. C. Hsieh, and C. C. Lin, "Strain measurement for composite tubes using embedded, fiber Bragg grating sensor," *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 167, No. 1, pp. 63-69, May 2011.
- [48] Online. <https://www.kyowa-ei.com/jpn/product/special/efox-1000b/what.html>
- [49] B. Yan, and L. Liang, "A novel fiber Bragg grating accelerometer based on parallel double flexible hinges," *IEEE Sens. J.*, Vol. 20, No. 9, pp. 4713-4718, 2019.
- [50] M. Nishiyama, and K. Watanabe, "Wearable sensing glove with embedded hetero-core fiber-optic nerves for unconstrained hand motion capture," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 58, No. 12, pp. 3995-4000, 2009.
- [51] M. Nishiyama, H. Sasaki, and K. Watanabe, "Optical intensity-based measurement of multipoint hetero-core fiber sensors by the method of time-differentiation in optical loss," *IEEE Sens. J.*, Vol. 8, No. 7, pp. 1055-1060, 2020.
- [52] Y. Koyama, M. Nishiyama, and K. Watanabe, "A motion monitor using hetero-core optical fiber sensor sewed in sportswear to trace trunk motion," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 62, No. 4, pp. 828-836, 2013.
- [53] H. Yamazaki, M. Nishiyama, K. Watanabe, and M. Sokolov, "Tactile sensing for object identification based on hetero-core fiber optics," *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 247, No. 15, pp. 98-104, 2016.

- [54] H. Yamazaki, and K. Watanabe, “Optical strain gauge-based on a hetero-core fiber macro-bending sensor,” *IEEE Sens. J.*, Vol. 20. No. 22, pp. 13387-13393, 2020.
- [55] M. Nishiyama, M. Sonobe, and K. Watanabe, “Unconstrained pulse pressure monitoring for health management using hetero-core fiber optic sensor,” *Biomedical Optics Express*, Vol. 7, No. 9, pp. 3675-3685, 2016.
- [56] J. P. Den Hartog, *Strength of Materials*. New York, NY, USA: Dover, 1949.
- [57] J. P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*. New York, NY, USA: Dover, 1934.
- [58] 一般社団法人 日本機械学会, “JSME テキストシリーズ 材料力学”, 丸善出版株式会社, 2007.
- [59] Online. <https://www.comsol.jp/products>
- [60] 中島康雄 他, “光ファイバ被覆層に発生する熱ひずみ・熱応力の測定方法”, *古河電工時報*, 第 122 号, pp. 8-12, 2008.
- [61] A. Umeda, M. Onoe, K. Sakata et al., “Calibration of three-axis accelerometers using a three-dimensional vibration generator and three laser interferometers,” *Sens. Actuators A, Phys.*, Vol. 114, No. 1, pp. 93–101, 2004.
- [62] T. Tsuchiya, O. Tabata, and A. Umeda, “Dynamic sensitivity matrix measurement for single-mass SOI 3-axis accelerometer,” in *Proc. IEEE 25th Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst. (MEMS)*, pp. 420–423, 2021.
- [63] A. Leal-Junior, and A. Frizera-Neto, “Optical fiber sensors for the next generation of rehabilitation,” Cambridge, Massachusetts, USA: Academic Press, 2022, [Online] Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323859523/optical-fibersensors-for-the-next-generation-of-rehabilitation-robotics#bookdescription>
- [64] A. Stefania, S. Andresen, W. Yuan, and O. Bang, “Dynamic characterization of polymer optical fibers,” *IEEE Sens. J.*, Vol. 12, No. 10, pp. 3047–3053, 2012.

謝辞

本研究を遂行するにあたって学内外の数多くの方々にお世話になりました。この場をお借りして、お世話になった方々への感謝の意を述べさせていただきます。本論文の指導教官であり、主査の准教授西山道子先生には、研究の進め方や論文執筆、研究発表についてのご指導を詳細に頂くとともに、研究に対する姿勢や心得をご指導いただきました。大変心細やかなご指導で、多くのこと学ばせていただき、深く感謝申し上げます。同じく副査をしていただきました教授 渡辺一弘先生、教授 窪寺昌一先生からは、研究発表会などの機会での多くのアドバイスをいただき、研究を進めるにあたり多くのご助言を頂きました。大変にありがとうございました。また、伊与田健敏准教授、崔龍雲教授、石井良夫准教授には研究室の垣根を越えて親身にしていただきました。感謝申し上げます。研究を進めるにあたり、宇宙航空研究開発機構(JAXA)航空技術部門の葛西時雄様には、特に専門的なご助言を頂き、投稿論文を作成の際には大きく改善され、大変学びになりました。感謝申し上げます。また、本研究室の先輩でもある山崎大志さんには、研究内容についてご助言を頂きました。感謝いたします。切磋琢磨した F6 研究グループの皆様、特にファイバグループ、レーザーグループの先輩後輩の皆様、実験にご協力いただき、また研究生生活において進捗会やゼミにおいて触発を頂きました。またご迷惑を沢山おかけしましたが、その中でも励ましを頂き大変お世話になりました、感謝致します。そして、今まで私を育て陰ながら支えてくださった母、姉兄弟に心から感謝いたします。最後に、常に私たち創大生を温かく見守り激励してくださった創立者 池田大作先生に深く感謝申し上げます。

著者論文および文献目録

[主論文を構成する学術論文]

1. Akihito Matsuo, Miyuki Kadokura, Hiroshi Yamazaki, Michiko Nishiyama, and Kazuhiro Watanabe.

Cantilever type accelerometer based on a mirror-terminated hetero-core optical fiber.

IEEE Sensors Journal. Vol. 21, no. 20: pp. 22464-22471, 2021.

2. Miyuki Kadokura, Hiroshi Yamazaki, Tokio Kasai, Kazuhiro Watanabe, and Michiko Nishiyama.

Sensitivity enhancement of a semicircular hetero-core optical fiber accelerometer with low cross-axis sensitivity.

IEEE Transactions on Instrumentation and measurement. Vol.71, 2022. (in press)

3. Miyuki Kadokura, Hiroshi Yamazaki, Tokio Kasai, Kazuhiro Watanabe, and Michiko Nishiyama.

Triaxial accelerometer based on a semicircular hetero-core fiber-optic sensor.

IEEE Sensors Journal. (Accepted)

4. Masanori Maeda, Miyuki Kadokura, Ryoko Aoki, Noriko Komatsu, Masaru Kawakami, Yuya Koyama, Kazuhiro Watanabe, and Michiko Nishiyama.

Fiber-optic non-invasive swallowing assessment device based on wearable pressure sensor. sensors. (Accepted)

5. 門倉美幸, 山崎大志, 葛西時雄, 渡辺一弘, 西山道子.

低周波振動モニタリングのための両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計.

電気学会論文誌 E. (投稿中)

[国際・国内会議報告]

1. 門倉美幸, 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘.

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曲率半径による周波数応答特性への影響.

電子情報通信学会ソサイエティ大会(口頭発表). 2019年9月. 大阪. 同講演論文集. B-13-38.

2. 松尾明人, 門倉美幸, 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘.

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.

電子情報通信学会ソサイエティ大会(口頭発表). 2019年9月. 大阪. 同講演論文集. B-13-39.

3. 門倉美幸, 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘.

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.

第63回宇宙科学技術連合講演会(口頭発表). 2019年11月. 徳島. 同講演論文集. 3M15.

4. Akihito Matsuo, Miyuki Kadokura, Hiroshi Yamazaki, Michiko Nishiyama, and Kazuhiro Watanabe.

Assessment of frequency response characteristics for a cantilever hetero-core fiber optic accelerometer.

The 8th Asia-Pacific Optical Sensors Conference (Poster). Nov. 2019. Auckland (New Zealand).

5. 門倉美幸, 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘.

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.

電子情報通信学会ソサイエティ大会(口頭発表). 2020年9月. オンライン. 同講演論文集. B-13-3.

6. Miyuki Kadokura, Hiroshi Yamazaki, Michiko Nishiyama, and Kazuhiro Watanabe.

Frequency characteristics of hetero-core fiber accelerometer with two orthogonal vibrational modes of an arch shape beam structure.

IEEE Sensors 2020 (Poster). Oct. 2020. Virtual conference.

7. Akihito Matsuo, Miyuki Kadokura, Hiroshi Yamazaki, Michiko Nishiyama, and Kazuhiro Watanabe.

Sensitivity and resonance frequency evaluations for a cantilever type hetero-core fiber optic accelerometer.

IEEE Sensors 2020 (Poster). Oct. 2020. Virtual conference.

8. 樹山さくら, 門倉美幸, 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘.

両端固定支持によるヘテロコア光ファイバ式3軸加速度センサの校正の検討.

電子情報通信学会光ファイバ応用技術(OFT)研究会(口頭発表). 2021年2月. オンライン. 信学技報. Vol. 120, No. 369, pp. 9-12.

9. Masanori Maeda, Miyuki Kadokura, Ryoko Aoki, Masaru Kawakami, Yuya Koyama, Michiko Nishiyama, and Kazuhiro Watanabe.

Non-invasive swallowing examination device using hetero-core fiber optic pressure sensor.

2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech) (Oral). Mar. 2021. Virtual conference. pp. 315-316.

10. Miyuki Kadokura, Kenta Suzuki, Hiroshi Yamazaki, Michiko Nishiyama, and Kazuhiro Watanabe.

Simultaneous detection of acceleration and liquid adhesion using light intensity-based hetero-core fiber optic sensors.

IEEE The International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) 2021 (Open Poster). May. 2021. Virtual conference.

11. 門倉美幸, 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘.

両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の低周波振動における感度向上の提案.

電子情報通信学会ソサイエティ大会(口頭発表). 2021年9月. オンライン. 同講演論文集. B-13-2.

12. 門倉美幸, 山崎大志, 西山道子, 渡辺一弘.
低周波振動のための両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の振幅応答特性評価.
電子情報通信学会光ファイバ応用技術(OFT)研究会(ポスター). 2021年10月. オンライン. 信学技報. Vol. 121, No. 199, pp. 33-34.
13. Masanori Maeda, Miyuki Kadokura, Ryoko Aoki, Masaru Kawakami, Yuya Koyama, Michiko Nishiyama, and Kazuhiro Watanabe.
Evaluation of non-invasive swallowing test device using hetero-core fiber optic pressure sensor.
IEEE Sensors 2021 (Oral). Oct. 2021. Virtual conference.
14. 門倉美幸, 西山道子, 渡辺一弘.
50-3-50型ヘテロコア光ファイバセンサの変位特性評価.
電子情報通信学会光ファイバ応用技術(OFT)研究会(口頭発表). 2022年2月. オンライン. 信学技報. Vol. 121, No. 376, pp. 5-8.
15. 前田大徳, 門倉美幸, 青木涼子, 川上勝, 小山勇也, 西山道子, 渡辺一弘.
ヘテロコア光ファイバ圧力センサを用いたハンズフリー嚥下機能評価デバイスの応答評価.
電子情報通信学会光ファイバ応用技術(OFT)研究会(口頭発表). 2022年2月. オンライン. 信学技報. Vol. 121, No. 376, pp. 9-12.
16. 門倉美幸, 渡辺一弘, 西山道子.
低周波振動モニタリングのための両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の周波数および横感度特性評価.
第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(ポスター). 2022年11月. 徳島. 14P5-P-36.
17. 柿田伸之, 前田大徳, 門倉美幸, 渡辺一弘, 西山道子
嚥下機能評価のためのウェアラブルヘテロコア光ファイバ伸縮センサの開発.
第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(ポスター). 2022年11月. 徳島. 14P5-P-39.
18. 前田大徳, 門倉美幸, 小松法子, 青木涼子, 川上勝, 小山勇也, 渡辺一弘, 西山道子.
ヘテロコア光ファイバ圧力センサを用いた非侵襲的嚥下機能評価デバイスの世代別応答評価.
第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(ポスター). 2022年11月. 徳島. 16P2-P-34.
19. 門倉美幸, 渡辺一弘, 西山道子.
付加質量を設置した両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の低周波領域における応答評価.
2023年電子情報通信学会総合大会. 2023年3月. 埼玉. (発表予定)