

## 光ファイバリング共振器を用いた音響センサ

Acoustic Sensor Using Fibre-Optic Ring Resonator

朴 己 煥\*・藤 井 陽 一\*\*  
 Ki-Han PARK and Yoichi FUJII

## 1. はじめに

光ファイバセンサは、圧力センサ、音響センサ、温度センサ、張力センサ、速度センサなど、いろいろな種類のセンサについて、活発な研究開発が行われている<sup>1)</sup>。この光ファイバセンサ中には、実用化されているものもある。光センサは、多く長所を持っている。とくに高感度が容易に得られるので、現代の先端科学分野、産業分野においておおいに期待されているものである。このような要求に合わせるために、光ファイバセンサにおいて、カプラと光ファイバリングを用いた新しい型の光センサが提案された<sup>2)</sup>。

本研究は、光ファイバリング共振器を用いた音響振動センサを開発することを目的とする。このセンサは、従来の音響振動センサに比べて、多少センサ部は大型化するものの、より高感度で、音響振動信号を測定することができる。また、形が大きいことを逆に利用すると、指向性の鋭い音響センサをつくることも可能である。

この実験の第1段階として、基本的な光ファイバリング共振器を設計し、これに、ピエゾ音響振動子を接着して、その音響振動信号を測定し、音響振動センサとして、この形式のものが、どのような振る舞いをするかを測定し、その結果を分析した。また、音響振動センサとしての応用の可能性を明らかにした。

## 2. 原 理

このセンサは、一本の単一モードファイバとファイバリングをカプラで結合して、リングをセンサに用いる形式のものである。リングファイバは、光共振器になる。外から、振動をこのリング共振器に加えると、その共振周波数が増える。この共振周波数の変化を検出することによって、加えられる振動の大きさを測定できる。

したがって、このセンサは、カプラの結合比とリング

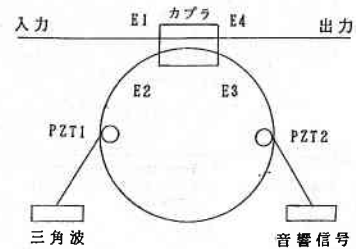


図1 光ファイバリングセンサの構成図

の長さによって感度が異なる。また、このセンサは、レーザのコヒーレンスにより感度が異なるので、リング内部の共振光による位相差よりも十分に長いコヒーレンス長が必要である。

本研究においては、リングの長さ2.60m、結合比0.96 : 0.04のカプラを使った。

本研究のリング共振器型センサの共振特性を測定するために、リングファイバに、PZT圧電セラミック素子を付けた。その一方は、共振周波数を掃引するために、もう一方は、被測定振動信号をファイバに印加するために用いる。

掃引用の変調信号は、10Hz、10Vp-pの三角波を使った。被測定の音響信号の周波数は、音響信号の振幅を固定して20Hzから2kHzまで測定可能である。また、音響信号の周波数を固定して、0.1Vから15Vp-pまで変化させながら測定した。

この測定においては、音響信号により出力の光強度が変わることを測定する。

リング共振器センサの構成図を図1に示す。

図1に示すように、安定化したHe-Neレーザの出力光を、単一モードファイバの入力E1へ入射する。

入力E1へ入った光は、入力光の96%が出力E4側へ出て、カプラを通過して残り4%の光がリングのE3の側へあらわれる。E3側へ出た光は、リング内を回りながらPZT1に加えた変調信号により変調されてE2側へ進む。E2からカプラを通過してE3へ進んだ光の一部は

\*元東京大学生産技術研究所 第3部

\*\*東京大学生産技術研究所 第3部

E4へ移り、残りの光は、続いてE1からE3へ移る光とともにリング内を回る。このように変調された光が、E4出力側へあらわれる。

したがって、E2からE4出力側へ移る光とE1入力からE4出力へ出る光が干渉して、共振時の出力は、大きいピークが現れる。このような大きいピークは、E1入力からE4出力へ出る光が非常に少なくなる形になって現れる。

E2からE4へ移る光とE2からE4出力側へ出る光が共振するときに、PZT2に被測定音響信号を加える。音響信号によりリングファイバの光学長が変化し、ある条件の位相のとき、共振することになる。

したがって、入力の被測定振動信号の周波数、振幅によってこのリング共振器の共振状態が変調される。1周回時の位相シフトが、入力信号に比例して変化する。その結果、共振特性は、位相変調 (PM) を受けることになる。

このとき、一定の周波数を持つレーザ光を入れると、その透過特性も、入力信号によって変調を受けることになる。

ここで、もう一方のPZTに掃引信号を加えると、等価的に、この共振器の周波数に対するスペクトル透過特性を測定することができる。そのスペクトル透過特性は、信号の周波数および振幅に応じて大きく変化する。

$\alpha$ をファイバ損失、 $k$ をカブラ内部における、入出力ファイバとリングファイバ間の結合係数とすると、図1のE1からE3、E4への結合比は下の式のとおりになる。

$$E3 = E1 [(1-\alpha)(1-k)] \quad (1)$$

E3からE2への結合は

$$E2 = E3 \exp(-\beta L) \quad (2)$$

になる。ここで、 $\beta$ は振幅減衰定数、 $L$ はリングの長さである。

$$E4 = E1 [(1-\alpha)k] \quad (3)$$

この実験において、式2のカブラの損失が5%結合係数 $k$ が0.96であるので $E4 = 0.955$ である。

### 3. 実 験

光ファイバリングセンサの実験装置図を図2に示す。

この実験ではコアの直径4 $\mu$ m、長さ2mのシングルモードファイバとリングの長さが2.60mのシングルモードファイバ二本を使った。対物レンズは20倍、光源は波長632.8nmの安定化He-Neレーザを使った。また、

表1 カブラのデータ

デバイスタイプ	分岐比	過剰損失	分岐比偏光特性 (最大変化量)	分岐比温度特性 (最大変化量)	アイソレーション
シングルモード 633-2 $\times$ 2	23.37% (780nm)	<0.01dB (780nm)	0.27% (780nm)	2% (780nm)	-65dB 最小

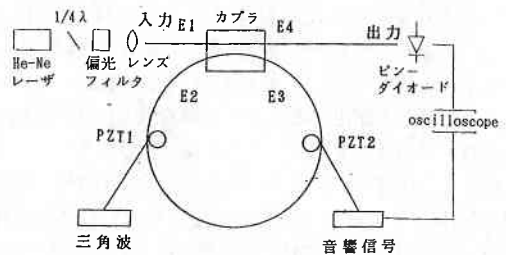


図2 光ファイバリング音響センサの実験図

光が光源への再入射の防止のために四分の1波長板と偏光フィルタを使った。直径が35ミリのPZT1には信号変調用にファイバを5回巻いた。音響信号を供給するPZT2には、光ファイバを7回巻いた。カブラは日本鉱業株式会社製で、結合比は0.96:0.04である。カブラのデータを表1に示す。

PZT1には10Hz、10Vp-pの三角波、PZT2には、音響信号の振幅を固定して、20Hz-2kHzの範囲で周波数を変化させながら供給した。また、音響信号の周波数を固定して、0.1V-15V (p-p)の範囲で振幅を変化させながら測定した。

### 4. 実 験 結 果

図3は、掃引用PZT1に周波数10Hz、振幅10Vp-pの三角波で掃引した時、E2からE4への出力と、E1からE4へ出る光を出力端のpinダイオードで検出した波形である。

図4は、掃引PZT1に三角波を供給した後、被測定PZT2に音響信号の一定の振幅0.1Vの信号を、周波数を20Hz~1500Hzの間で変化させた測定結果である。

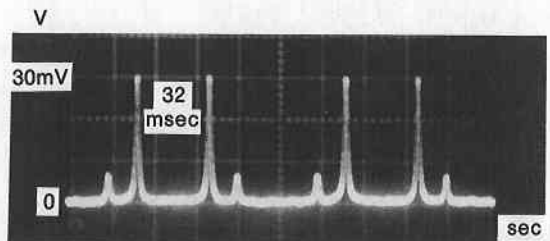


図3 PZT1に供給した三角波により共振した出力波形

研 究 速 報

1 kHz 以下においては、出力のピークはが段々小さくなり、1 kHz 以上においては、ピークはほぼ一定になる。

これは、振幅の小さいところでは、共振器の特性は微小変化であるが、振幅の大きいところでは、位相変化による干渉効果が飽和するためである。

図 5 は、掃引 PZT 1 に三角波、被測定 PZT 2 に音響信号の振幅 1 V で固定した周波数を 20Hz ~ 2 kHz まで変化させながら測定した結果である。100Hz 以下において、出力のピークが一定な比率の減衰をした。しかし、音響信号 100Hz からは、緩慢に減衰し、主ピーク周囲に小さいピークが生じることがわかる。これは、位相変調された波のサイドバンドと同様な現象である。

図 6 は、PZT 2 に振幅一定の音響信号振幅 5 V、周波数を 20Hz ~ 2 kHz まで変化させながら測定した結果の中で、(a) 20Hz、(b) 60Hz、(c) 200Hz の時の波形である。図で、上方は出力波形、下方は、被測定音響信号である。

被測定振幅が大きいので、出力波形の振幅変化、位相変調現象が、顕著にあらわれる。

図 7 は、被測定 PZT 2 に音響信号を一定の振幅 10V で周波数を 20Hz ~ 2 kHz まで変化させながら測定した結果の中において、(a) 40Hz、(b) 300Hz 時の結果である。入力信号がさらに大きいので、位相変調現象がさら

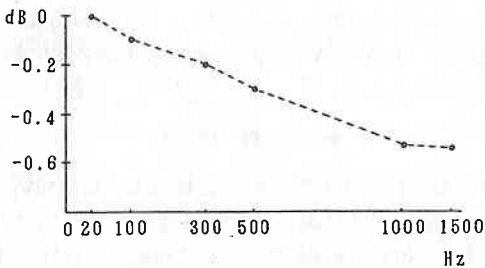


図 4 PTZ 2 に信号振幅 0.1V を加えて、周波数を 20-1500Hz まで可変させた時のピーク変化図

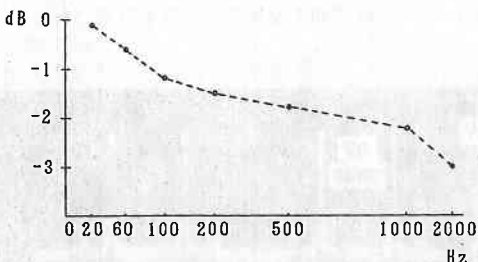


図 5 PTZ 2 に信号振幅 1V を加えて、周波数を 20-2000Hz まで可変させた時のピーク変化図

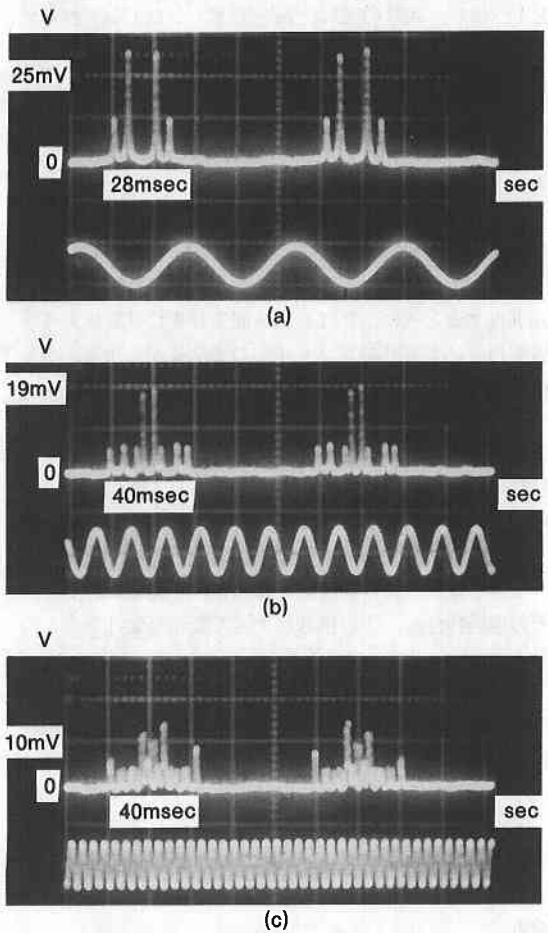


図 6 PZT 2 に信号振幅 5V を加えて、周波数を可変した時のピーク変化図  
(a) 周波数 20Hz  
(b) 周波数 60Hz  
(c) 周波数 200Hz

に顕著になっていることがわかる。また、PZT 2 に振幅 15V の音響信号を供給すると、40Hz から多数のピークが発生するのが見られる。

図 8 の(a), (b), (c)は、PZT 2 の音響信号の周波数を 200Hz に固定した信号の振幅を変化させて測定した結果である。これから、音響信号の振幅の影響をより明確に見ることができる。

5. 結 論

この研究では、光ファイバのリング共振器を用いた音響センサについての基礎実験を行った。

被測定信号を、PZT から与え、そのとき、振幅によって、共振器のスペクトル透過特性を測定した。この

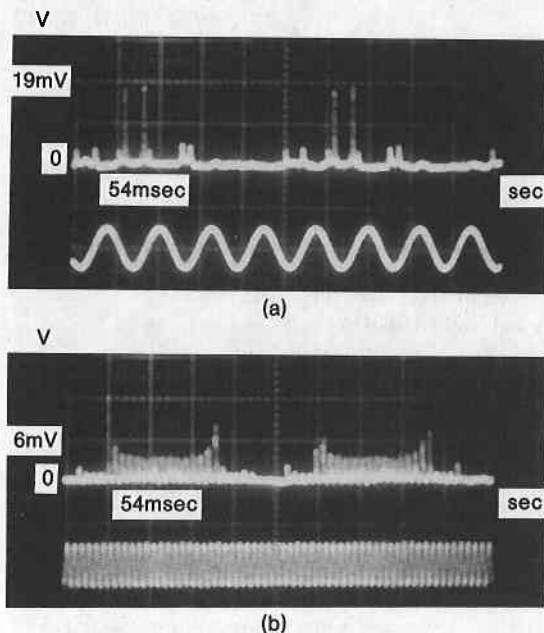


図7 PZT 2 に信号振幅10Vを加えて、周波数を可変した時のピーク変化図

(a) 周波数40Hz

(b) 周波数300Hz

結果から、振幅が小さいときは、振幅変調的特性、振幅が大きいときは、位相変調的特性を示すことが示された。

本研究によって、このようなリング共振器が音響振動センサとして使用可能であること、またそのときは、位相変調型の特性を示すので、そのような検出法を考えなければならないということが示された。

今後、このリング共振器型のセンサを実際の音響振動センサとして開発して行く計画である。

本研究を進めるにあたり、尾崎政男氏、近藤由紀子氏、加藤考利氏の助力を得た。感謝する次第である。

(1993年7月13日受理)

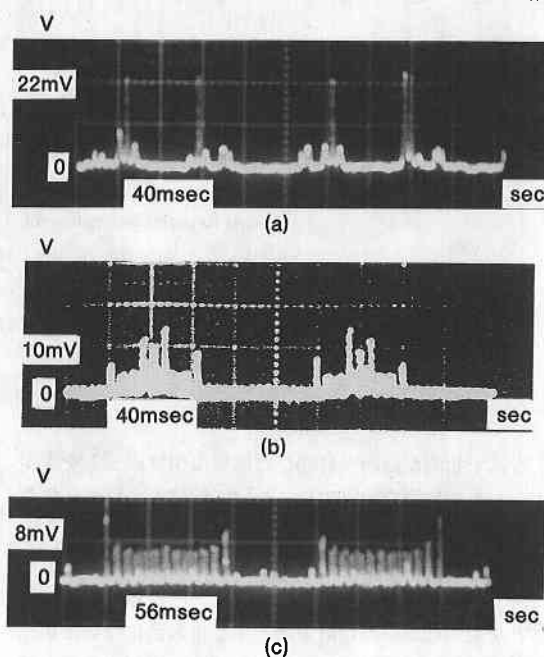


図8 PZT 2 に周波数200Hzを加えて、信号の振幅を可変した時のピーク変化図

(a) 振幅1Vp-p

(b) 振幅5Vp-p

(c) 振幅10Vp-p

#### 参考文献

- 1) T. G. Giallorenzi, "Optical Fiber Technology," J. Quantum Electron., vol. QE-18, no. 4, pp 626, 1982.
- 2) W. B. Spillman, J. R. Lord, "Self-Referencing Multiplexing Technique for Fiber Optic Intensity Sensor," IEEE, vol. LT-5, no. 7, pp 865, 1987.
- 3) L. F. Stokes, M. Chodorow, and H. J. Shaw, "All-Single Mode Fiber Resonator," Optical Society of America, vol. 7, no. 6, pp 288, 1982.