ファイバオプティクスによる鼓膜の微小変位と 微小振動の測定[†]

鳥羽 栄治*・陸 建忠*・伊藤 和也**・田口 喜一郎**

Measurement of Microscopic Displacement and Vibration of Tympanic Membrane by Means of Fiber Optics

Eiji TOBA*, Kenchiu RIKU*, Kazuya ITO** and Kiichirou TAGUCHI**

A sensor by means of optical fiber bundle was developed for detecting microscopic displacement and vibration in tympanic membrane. Illuminating a planer object and detecting the reflected light with the bundle, we experimentally investigated the received optical intensity against the distance from the object. As a practical application to clinical examinations, we then measure the displacements and vibrations of tympanic membranes of a dog.

The main results of experiments are as follows.

- 1) The reflected intensity increases rapidly with the distance in the front slope region at a small distance, then it reaches the maximum at a certain distance. As the distance increases further into the back slope region, it decreases linearly. Straight line portions of such a intensity-distance characteristics enable us to obtain inversely the displacements and vibrations from the intensity measured.
- 2) The displacement resolution is $0.05\ \mu\text{m}$. The sensitivity is $9.85\ \text{mV}/\mu\text{m}$ for the region with $L=0.1\text{--}0.5\ \text{mm}$ (front slope region) and $7.97\ \text{mV}/\mu\text{m}$ for $L=1.0\text{--}1.7\ \text{mm}$ (back slope region).
- 3) The frequency response of dog tympanic membrane was successfully measured for frequency range with $100\text{--}8,000\ \text{Hz}$. We conclude that the fiber optics bundle well

detects the microscopic displacements and vibrations in tympanic membranes and its application to clinical examinations are expected.

Key Words: fiber optics, tympanic membrane, non-contact measurement, displacement, vibration

1. はじめに

光通信を目的として開発されてきた光ファイバは数多くの優れた特徴をもっている光伝送路である。光ファイバは通信用伝送路のほかに、光ファイバの特徴を巧みに計測に活用した光ファイバ・バンドル型光沢および変位測定用センサの開発^{1)~4)}が盛んに行われている。光ファイバセンサは従来の電気的センサでは適用が困難と思われるような測定対象に新たな計測手段を与えてくれる。特に人体の鼓膜の振動、変位の測定用として有力な非接触センサとなりうるので、この開発が望まれている。これまでに開発された光ファイバ・バンドル型センサは単光ファイバ直径の大きいプラスチック光ファイバやガラス光ファイバが使用されているため、バンドル径が比較的大きくなっている。さらに、この受光特性において、受光感度が低く、直線性を有する範囲が狭いなどの点で狭空間の振動や変位の測定が困難となっている。

本研究は人体の鼓膜のような非常に狭い部位の微小振動や変位を非接触で測定できる光ファイバセンサの開発を目的としている。実験では光ファイバ・バンドル径をできる限り細くし、かつ、光ファイバ・バンドルの受光感度の向上と直線性を有する範囲を大きくするために、超細径多成分単光ファイバによる種々の光ファイバ・バンドルを試作しこれらの反射光受光特性を明らかにした。さらに、光ファイバ・バンドルにより非接触で成犬の鼓膜の定量的な微小振動・変位の測

[†] 第28回計測自動制御学会学術講演会で発表 (1989・7)

* 信州大学繊維学部 上田市常田 3-15-1

** 信州大学医学部 松本市旭 3-1-1

* Faculty of Textile Science and Technology,
Shinshu University, Ueda

** Faculty of Medicine, Shinshu University,
Matsumoto

(Received April 20, 1990)

(Revised August 8, 1990)

定を試み⁵⁾⁻⁷⁾、実験的にその特性を検討⁸⁾し、臨床的応用の有効性を確かめた。

2. 変位、振動センサの原理

Fig. 1 に本実験で試作した代表的な同心円光ファイバ・バンドルの変位、振動センサの構造と原理を示す。光源からの光を内側部の投光用光ファイバ束で導き、測定試料面に垂直に照射する。投光用ファイバ束から照射された光は測定試料表面の表面状態に応じて散乱反射する。この反射光を再び外側部の受光用ファイバ束で拾い受光素子に導き光出力として検出する。光ファイバ束で検出された受光強度（光出力）は光ファイバ出射端面と測定試料表面との距離が離れるに従って直線的に大きくなり、ある位置で最大値をとり、以後は距離の増加に伴い直線的に減少する。この立ち上がり領域（フロントスロープ）あるいは立ち下がり領域（バックスロープ）において、変位と光ファイバ束で検出される受光強度は直線的比例関係が成立^{1),4)}している。したがって、フロントスロープ部分あるいは

バックスロープ部分における光ファイバ出射端面と測定試料表面との距離の変化に伴って光ファイバ・バンドル受光強度が直線的比例関係が保たれていることを利用すると変位の測定が可能となる。

Fig. 1 に示したような光ファイバ出射端面と測定試料表面との距離を L とし、 L を中心に ΔL だけ ab 間で振動している測定試料面を考えると、フロントスロープの場合、測定試料面が a の位置での受光強度を $E(a)$ 、 b の位置での受光強度を $E(b)$ とすると、 b の位置のほうが a の位置のときより光ファイバ・バンドルの受光面積が大きくなり、したがって、 $E(b)$ が $E(a)$ より大きくなる。これを連続的に図示すると **Fig. 2** のようになる。**Fig. 2** に示した交流分の振動周期と振動振幅から振動周波数と振動変位が求められる。

3. 実験装置および方法

Fig. 3 に光ファイバ・バンドルの変位受光特性を測定する装置の概略を示す。He-Ne レーザー光（波

Fig. 1 Structure and principle of optical fiber bundles sensor

Fig. 2 Principle of measurement of the vibration displacement

Fig. 3 Experimental setup for measuring characteristics of displacement

Fig. 4 Experimental setup for measuring displacement and vibration

長 $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$) を投光用光ファイバ束で導き、光軸に垂直になるようにセットした測定試料に照射する。測定試料面と光ファイバ出射端面との距離 L を変化させたときの反射光量を受光用光ファイバ束で受光し、フォトダイオードで電気信号に変換する。この電気信号を増幅して、光出力を直流電圧計で測定する。

Fig. 4 に光ファイバ・バンドルによる変位と振動を測定する装置の概略を示す。He-Ne レーザ光を投光用光ファイバ束で導き、光軸に垂直になるようにセットした測定試料面に照射する。試料面と光ファイバ出射端面との距離 L を一定とし、 L を基準として ΔL だけ振動変位させたときの反射光量を受光用光ファイバ束で受光する。この反射光量をフォトダイオードで電気信号に変換し、増幅器で増幅後、能動フィルタにより S/N 比を向上させ、オシロスコープにより振動周期と振動振幅値を測定し、前もって測定されている光ファイバ・バンドルの変位受光特性に基づいて変位に換算する。

本実験では Fig. 1 に示したような光ファイバ束の中心部分を投光用、外側部分を受光用とする同心円型光ファイバ・バンドルを主に使用した。光ファイバ・バンドルは単ファイバの直径 $14\ \mu\text{m}$ 、開口数 (NA) が 0.56 の多成分ガラス光ファイバを六方最密構造となるように配列し、全体で約 3,000 本束ねて外径を約 1 mm にバンドル化している。光ファイバ・バンドルの単位面積当たりの投光用と受光用の有効面積を増し、受光感度を向上させるために、できる限り単ファイバ径を細くしている。また光ファイバ・バンドルの投光用ファイバ束に対する受光用ファイバ束の面積比³⁾を大きくすることにより面積比を同じにした場合よりも光ファイバ出射端面と測定試料面との距離 L (直線性を有する範囲) を長くとれるように工夫している。

4. 実験結果および検討

Fig. 5 に測定試料の表面状態の変化による反射率を変化させた場合の同心円型光ファイバ・バンドルの比光出力と距離の関係の受光特性を示す。(a)は鏡面状態の薄いアルミ箔、(b)は表面あらさが約 $8\ \mu\text{m}$ 程度の薄いアルミ箔、(c)は表面あらさが約 $18\ \mu\text{m}$ の薄いアルミ箔を示す。これらすべての試料が光ファイバ出射端面と測定試料との距離 L の増加に伴い直線的に増加した後、 L が約 0.85 mm で最大値をとり、以後はほぼ直線的に減少している。測定試料の表面粗さの違いにより受光強度が大き

Fig. 5 Typical characteristic curve of concentric-circular type fiber bundle

く変化しているので変位、振動測定の場合には反射率を求めて補正をする必要がある。変位測定に用いるファイバ・バンドルとして、ここで、(a)の受光特性曲線のフロントスロープの変位測定感度を求めると、 $L=0.1\sim 0.5\text{ mm}$ のとき $9.85\text{ mV}/\mu\text{m}$ 、 $L=1.0\sim 1.7\text{ mm}$ のとき $7.97\text{ mV}/\mu\text{m}$ となり、 $0.05\mu\text{m}$ の測定分解能で変位の測定が可能であることが判明した。光ファイバ・バンドルの受光強度は L と試料表面の反射率とに依存しており、試料表面あらかが鏡面に近い状態になるほど増加している。

Fig. 6 に振動子としてスピーカーを使用し、スピーカーコーン部分と同心円光ファイバ・バンドル出射端面との距離 L を約 0.4 mm としたときのスピーカーのコーン部分の変位と振動数の関係を白丸印で示し、ダイヤルゲージ ($0.5\mu\text{m}/\text{Div}$) で実測したスピーカーの変位と振動数の関係を黒丸印で示す。なお、ここで、発振器よりスピーカーに印加する電圧は約 300 mV と一定とし、スピーカーのコーン部分には質量が無視できるような微小のアルミ薄膜を密着し、これを測定対象とし、振動周波数を変化させている。また、ダイヤルゲージによる変位測定法として、ダイヤルゲージの先端に針状の電極を取り付け、電極の先端が振動面と接触しているか、いないかで発光ダイオード (LED) が点滅するようなシグナルインジケータ方式の電気回路を構成し、まず、電極の先端と振動面とを接触させ、LED が点灯しはじめた位置でのダイヤルゲージの読みを基点とし x_1 とする。つぎに、電極の先端と振動面との距離を離れた位置に設定し、振動面を一定の周波数で振動させ、LED が点灯しはじめるまで電極の先端を振動面に接近させ、こ

Fig. 6 Relation between value of fiber bundle and dialgauge

Fig. 7 Measurement value of changing operate point

の位置でのダイヤルゲージの読みを x_2 とする。ダイヤルゲージの読みの差 ($x_1 - x_2$) を測定し、この値を2倍して変位値とした。光ファイバ・バンドルの受光強度により間接的に求めた変位値とダイヤルゲージにより実測した変位値とがほぼ一致している。これは光ファイバ・バンドルをセンサとして使用する場合、信頼性が非常に高い変位センサであることを示している。

Fig. 7 に振動子の変位を $5\mu\text{m}$ および $2.5\mu\text{m}$ と一定にし、光ファイバ出射端面と測定対象との距離 L 、すなわち、動作点をフロントスロープでの直線性が保たれている範囲内で変化させた場合の変位実測値を示す。動作点が 0.2 mm から 0.5 mm のとき、ほとんど実測値と一致している。このことはフロントスロープでの動作点を $0.2\sim 0.5\text{ mm}$ とするとこの間の測定感度が不変であることを示しており、 $0.2\sim 0.5\text{ mm}$ において任意点を選定できる。さらに、バックスロープにおいても、動作点を $1.0\sim 1.7\text{ mm}$ とした場合にも測定感度が不変であることが判明した。

Photo. 1 に L を約 0.4 mm とし、スピーカーの振動数を 300 Hz および $3,000\text{ Hz}$ としたときの代表的な測定波形例を示す。(a)は発振器からの基準波形を示し、(b)は光ファイバ・バンドルからの出力波形を示す。周波数が $100\sim 8,000\text{ Hz}$ では、(a)と(b)の出力波形は高周波になるに伴い位相のずれが多少生じているが、振動の周期は基準波形と一致している。したがって、光ファイババンドルからの出力波形の振幅と周期を測定することにより変位と振動周波数などを求めることができる。**Fig. 8** に成犬の頭骸骨から摘出した鼓膜に加える音圧を 90 dB と一定とし、これを印加した場合、成犬の耳の鼓膜の周波数変位特性例を示す。同心円光ファイバ

Photo. 1 Frequency characteristics of aluminum thin film at 300 Hz and 3,000 Hz

Fig. 8 Frequency characteristic of dog's tympanic membrane

出射端面と鼓膜との距離は約 0.4 mm とし、周波数を 100~8,000 Hz まで変化させている。振動数が高くなると共に鼓膜の振動変位が小さくなっている。周波数が約 600 Hz で振動変位にピークを生じているのは外耳道との共鳴によるものと考えられる。このことは本光ファイバ変位振動センサを使用すると、鼓膜のような狭空間での微小な振動や変位を非接触で定量的に測定ができることを示しており、臨床検査への応用が期待できる。臨床検査において、本光ファイバセンサを利用した鼓膜可動性の定量的な測定が可能となること

により、伝音性難聴の診断や中耳疾患の診断など⁹⁾の一助として十分に効力を発揮し、特に、聴力検査のできない幼小児に有効と考えられる。本実験では鼓膜に印加する音圧を 90 dB としているが、音圧を低くした場合でも S/N 比を向上させることにより、測定可能と考えられる。今後、さらに、外耳道内でのセンサ部の固定方法と外耳道に対する鼓膜の角度測定法などを検討し、in vivo での測定実験を進める予定である。

5. ま と め

本論文では、鼓膜の微小振動や微小変位などを非接触で測定可能な光ファイバ・バンドル型センサを試作し、この受光特性を明らかにし、さらに、成犬の鼓膜の微小変位、微小振動の測定を試み、臨床応用への有効性を検討した。

1) 本光ファイバ・バンドルによるセンサは非接触で狭空間の微小振動や微小変位の測定が可能であり、センサ端面にレンズ系を使用していないので、測定系が非常にシンプルである。

2) 光ファイバ・バンドルの反射光受光強度は光ファイバ出射端面と測定試料との距離 L が離れるに従って、直線的に大きくなり、ある L で最大値をとり、以後は逆にほぼ直線的に減少する。この曲線の直線部分を利用すると変位と振動の測定が可能である。

3) 本光ファイバ・バンドルセンサの変位測定の分解能は $0.05 \mu\text{m}$ であり、測定感度は $L=0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ (フロントスロープ) のとき、 $9.85 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 、 $L=1.0 \sim 1.7 \text{ mm}$ (バックスロープ) のとき、 $7.97 \text{ mV}/\mu\text{m}$ である。

4) 成犬の鼓膜とセンサ端面との距離 L を約 0.4 mm、鼓膜に印加する音圧を一定とすると、振動周波数が 100~8,000 Hz で鼓膜の振動と変位が測定可能であり、本センサの臨床検査への応用が期待できる。

参 考 文 献

- 1) 三好隆志：光ファイバ束を用いた変位センサの受光特性、センサ技術、2-11, 47/50 (1982)
- 2) 井上、ほか：光学ファイバによる研削仕上げ面あらさのインプロセス測定、日本機械学会論文集 (C 編)、47-424, 1672/1679 (1981)
- 3) 三好、ほか：ファイバオプティクスによる光沢センサの試作開発、精密機械、47-3, 74/79 (1981)
- 4) M. Johnson, et al.: One-and Two-Dimensional, Differential, Reflective Fiber Displacement Sensors, Appl. Opt., 24-15, 2369/2372 (1985)
- 5) 鳥羽、ほか：光ファイバ・バンドルによる鼓膜可動性の一測定、繊維学会シンポジウム予稿集、B-33/B-35 (1988)

- 6) 鳥羽, ほか: 光ファイバ・バンドルによる鼓膜可動性の測定, 第 28 回 SICE 学術講演会予稿集, 357/358 (1989)
- 7) 鳥羽, ほか: ファイバオプティクスによる非接触微小変位, 振動の測定, SICE 第 7 回 センシングフォーラム 論文集, 91/95 (1990)
- 8) G. G. Moross: Applications of Non-Imaging Flexible Fiber Optics in Medicine and Dentistry, Proc. SPIE, 14, 91/98 (1968)
- 9) 沖津, ほか: 鼓膜可動性検査と Tympanometry, 耳喉, 48-2, 15/21 (1976)