

端面反射型光ファイバマイクの空気中における指向性測定*

○大岡佳生, 星 貴之 (ピクシーダストテクノロジーズ株式会社)

1 はじめに

超音波を使用した超指向性スピーカや非接触触覚提示、音響浮揚などの応用が広まるにつれ、高周波数・高音圧を測定可能なマイクロホンの需要が高まっている。例えば非接触触覚提示では手のひらの皮膚を振動させるため音響放射圧を利用しているが、そのために用いられる超音波の周波数は 40 kHz であり、その音圧レベルは 160 dB を超えることもある。これは現状市販されている高周波数・高音圧に対応したマイクロホンで測定可能な音圧のほぼ上限にあたり、これ以上音圧が大きい場合には測定不能となる。

また超音波 (20kHz 以上) は波長が 2 cm 未満と短いため、マイクロホンのサイズの影響も考慮する必要がある。可聴音では問題ないサイズであっても、超音波に対しては周波数特性がフラットではなくなったり、音場を乱してしまうことにより真の値が得られなくなる。市販のマイクロホンには直径 1/4 インチ (= 6.35 mm)、1/8 インチ (= 3.175 mm) など数 10 kHz の波長よりも小さいものもあるが、それでもサイズに依存する指向性には注意が必要である。

ところでファイバオプティクス分野では、光ファイバが温度や歪に感度をもつセンサとして利用されている。光ファイバ先端における反射係数は外界の屈折率変化の影響を受けるため、音響センサとしての利用も提案されている [1, 2] (Fig. 2)。

上記音響センサを端面反射型光ファイバマイクと呼ぶこととする。これは強力超音波の測定が可能であり、また光ファイバは直径 1 mm 程度と細いため音場を乱しにくく無指向性に近いことが期待される。水中超音波に対する指向性特性は報告されている [3] もの、空中超音波に対する指向性特性についての報告はこれまでなされていない。

本研究では空気中において 40 kHz 超音波を 160 dB SPL 程度まで出力し、それを端面反射型光ファイバマイク (Fig. 2) で測定した。その線形性と指向性について報告する。

2 端面反射型光ファイバマイクの原理

端面反射型光ファイバマイクは、音波が屈折率変化を引き起こすことに注目し、音圧を境界面における光反射強度に変換して光検出器で測定する。即ち、音-

光-電気変換センサである。以下に原理を示す [1]。

まず、音波による体積変化率 $\Delta V/V$ が空気の屈折率変化 Δn に対応すると仮定する [1]。

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta n}{n_a - 1} \quad (1)$$

n_a は音場のない際の空気の屈折率である。光ファイバ端における反射率は、空気の屈折率を $n = n_a + \Delta n$ とし、光ファイバの屈折率を n_f とすると、フレネルの式から、

$$\left(\frac{n_f - n}{n_f + n}\right)^2 \quad (2)$$

である。よって、反射率変化 ΔR は音波を入射しない場合の反射率 R を用いて、線形近似の下で、

$$\frac{\Delta R}{R} \simeq -\frac{4n_f}{(n_f - n_a)(n_f + n_a)} \Delta n \quad (3)$$

と表せる。この反射率変化の割合は、フォトダイオードを用いて光強度を電流に、I-V コンバータで電流を電圧に変換すると、出力電圧の DC 成分 V_{DC} と AC 成分 V_{AC} の比 $\frac{V_{AC}}{V_{DC}}$ に一致する。

このため、(1),(3) 式とポワソンの法則から、

$$\frac{V_{AC}}{V_{DC}} \simeq -\frac{4n_f}{(n_f - n_a)(n_f + n_a)} \frac{n_a - 1}{c^2 \rho} p \quad (4)$$

となり、屈折率 n_a と n_f 、音速 c 、大気密度 ρ を用い、出力信号から理論的に音圧 p が求められる。

3 実験概要

3.1 線形性の測定

実験は全て無響箱の中で行った。無響箱の外に測定機器や光ファイバマイク本体を設置し、マイクロホンや光ファイバマイクを無響箱内に導いて測定に使用

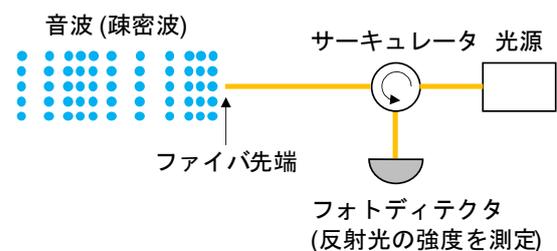


Fig. 1 端面反射型光ファイバマイク

* Directivity of the optical fiber microphone based on boundary reflection, by O-OKA, Yoshiki and HOSHI, Takayuki (Pixie Dust Technologies, Inc.).

した。音場は 40 kHz の超音波振動子アレイを用いて超音波を集束させることで生成した。測定地点の音圧は超音波振動子アレイへの駆動信号を制御することで変化させ、予め、ACO 4158 N (保護グリッド無し) で校正した参照マイク [4] で実測した。次に、光ファイバ先端を測定地点に配置した。光ファイバは被覆含めて直径 0.9 mm のシングルモードファイバを使用し、その先端 1 cm ほどは直径 0.125 mm の芯線を露出させた。光源としては ASE 光源 (20 mW, 1530-1560 nm) を使用した。フォトディテクタの出力電圧を FFT にかけて、40 kHz 成分を抽出して V_{AC} とした。また出力電圧の時間平均値を V_{DC} とし、(4) 式に従って音圧を算出した。測定は 10 回ずつ行い、平均値をそれぞれのマイクによる音圧とした。

Fig. 3 に参照マイクによる音圧レベルに対する光ファイバマイクによる音圧レベルをプロットした結果を示す。青点が実測値、黒線が音圧が一致する場合の直線である。140 dB 以上において、参照マイクによる音圧レベルに対する光ファイバマイクによる音圧レベルの音圧一致直線からの乖離は 1.3 dB 以内に収まり、光ファイバマイクの音圧センサとしての線形性が確認できた。

3.2 指向性測定

続いて、光ファイバマイクの指向性を測定した。音場は線形性の測定と同様に振動子アレイを用いて超音波を集束させて生成した。光ファイバ先端は回転台上に自立した直径 0.9 mm の金属ワイヤーに沿わせて接着固定した。もっとも太い部分でも光ファイバと金属ワイヤーの直径の和 (1.8 mm) であり、超音波の波長 8.5 mm よりも十分に小さく音場を乱しにくいことを期待している。そして光ファイバ先端を回転台の回転中心になるように配置した (Fig. 4)。光ファイバ先端方向を角度 0° として 350° まで 10° 毎に音圧を 10 回ずつ測定し、平均値を求めた。

光ファイバマイク角度に対し、最大値である音圧レベル 158.3 dB を 0 dB としてプロットしたポーラパターンを Fig. 5 に示す。いずれの角度に対しても、測定値は 1.0 dB 以内に収まった。光ファイバマイクの指向性は全方位ほぼフラットだといえる。

4 おわりに

本研究では、端面反射型光ファイバマイクを作成し、その線形性と指向性を測定した。始めに、音圧を変化させながら、その音圧を測定した。参照マイクとの音圧レベルの差は 1.3 dB 以内となり、線形性が確認できた。その後、音圧を一定にしたまま、光ファイバマイクの向きを変化させながら音圧を測定した。

角度 -180° から $+180^\circ$ までの 360° における 1.0 dB 以内のほぼフラットな指向性であった。これらの結果から光ファイバマイクは 40 kHz 超音波に対して、理論に基づいて得られた測定値の正確性が高く、また音場を乱しにくくほぼ無指向性であることが示された。

謝辞 本研究は中村健太郎 教授 (東京工業大学) に助言をいただきながら実施されたものである。

参考文献

- [1] Takei *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **46** (7S), 4555-4557, 2007.
- [2] Shen *et al.*, 音講論 (秋), 1447-1148, 2009.
- [3] Shen *et al.*, 音講論 (秋), 1151-1152, 2010.
- [4] 戸田 (他), 信学技報, **115** (385), 37-40, 2015.

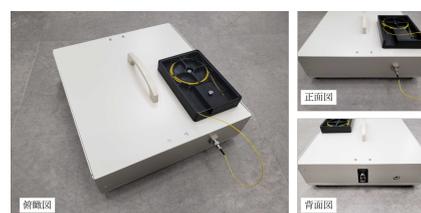


Fig. 2 光ファイバマイク OF-MC-01

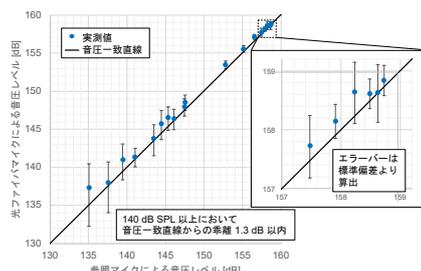


Fig. 3 光ファイバマイクの線形性 (40 kHz の場合)

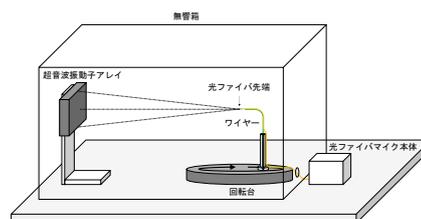


Fig. 4 指向性測定実験系

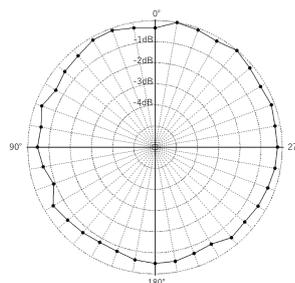


Fig. 5 光ファイバマイクの指向性 (40 kHz の場合)