

○星 貴之, 大岡 佳生 (ピクシーダストテクノロジーズ株式会社)

## 1 はじめに

音響インテンシティは単位時間に単位面積を通過する音響エネルギーを表すベクトル量であり、実用的には音響パワーの計測や音源位置の特定に利用することができる。これまでに可聴音を対象としたインテンシティマイクロホンが販売されている [1]。今後、空中における強力超音波の利用が進むにつれて超音波を対象としたインテンシティマイクが求められることが予想される。

インテンシティマイクは2本の音圧マイクを近接配置する P-P 型が一般的である [1]。粒子速度の時間微分が音圧の空間微分に比例することを利用して、音圧の空間差分によって粒子速度を近似的に求める。得られた粒子速度に音圧をかけて、時間平均をとることによって音響インテンシティを求めることができる。この計測を正しく行うためにはマイク間隔を十分に小さくするとともに、マイク自体が音場を乱さないことが求められる。特に波長が短い超音波帯域においてこれらの要件を満たすためには、波長と比べて十分に細いプローブが必要である。

筆者らは超音波を対象として、光ファイバをプローブとして用いたインテンシティマイクを提案している [2]。直径 0.9 mm の光ファイバをプローブとして用いたマイクは 40 kHz (波長 8.5 mm) の超音波に対してほぼ無指向性である [3]。よってこれを 2 本並べた際にも音場をほぼ乱さないことが期待できる。

本稿では提案する光ファイバ P-P インテンシティマイクの原理を説明し、その妥当性を実験によって確認する。

## 2 P-P インテンシティマイク

### 2.1 基礎原理 [1]

音響インテンシティの  $r$  方向成分  $I_r$  [W/m<sup>2</sup>] は、音圧  $p$  [Pa] と粒子速度の  $r$  方向成分  $u_r$  [m/s] の積の時間平均として次式で表される。

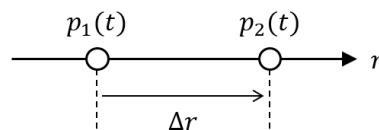


Fig. 1 Arrangement of two microphones

$$I_r = \overline{p(t) u_r(t)} \quad (1)$$

ここで  $t$  [s] は時間である。

$r$  方向に間隔  $\Delta r$  [m] だけ隔てて配置された 2 本のマイク (Fig. 1) が測定する音圧を  $p_1$  および  $p_2$  とすると、 $I_r$  は次式によって近似的に求められる。

$$I_r \approx \frac{1}{2T\rho\Delta r} \int_0^T \left\{ [p_1(t) + p_2(t)] \int_0^t [p_1(\tau) - p_2(\tau)] d\tau \right\} dt \quad (2)$$

ここで  $T$  [s]、 $\tau$  [s] は時間、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] は空気の密度である。

### 2.2 ピュアトーンの場合

強力超音波を利用する際には、特定の周波数 (例えば 40 kHz) が支配的である場合が多い。単一周波数  $\omega$  [rad/s] の信号を想定すると、振幅  $A$  [Pa]、位相差  $\varphi$  [rad] として 2 本のマイクが測定する音圧は下記で表される。

$$\begin{cases} p_1(t) = A \cos(\omega t) \\ p_2(t) = A \cos(\omega t - \varphi) \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) を式 (2) に代入して計算すると次式が得られる。

$$I_r \approx \frac{A^2 \sin \varphi}{2\omega\rho\Delta r} \quad (4)$$

式 (2) では時間積分と時間平均を実行する必要があるが、式 (4) では個々のマイクが測定した信号をフーリエ変換して対象周波数の振幅と位相を取得すれば音響インテンシティを求めることができる。後者はノイズの影響を受けにくいことも期待できる。

## 3 実験

### 3.1 実験環境

無響箱の中に構築した実験系を Fig. 2 に

\* Study on Optical Fiber P-P Intensity Microphone, by HOSHI, Takayuki and O-oka, Yoshiki (Pixie Dust Technologies, Inc.).

示す。超音波フェーズドアレイ [4] を用いて測定対象の超音波焦点（周波数 40 kHz、焦点距離 200 mm、出力設定値 0.1）を形成した。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 ほど直径 0.125 mm の芯線を露出させた。光ファイバがたわまないよう直径 0.9 mm の金属ワイヤーで補強して XYZ ステージにより保持した。2 本の光ファイバの先端を超音波焦点の位置に配置し、XYZ ステージによってフェーズドアレイに近いほうの光ファイバ先端を移動させることでマイク間隔  $\Delta r$  を変化させられるようにした。



Fig. 2 Experimental setup

### 3.2 光ファイバ P-P インテンシティマイク

試作機の機器構成を Fig. 3 に示す。ASE 光源（40 mW, 1528-1563 nm）から出た光をビームスプリッタにより 2 本の光ファイバに入射させた。光ファイバの先端では音波に伴う空気の密度変化によって反射率が変化する [3]。そこでの反射光をサーキュレータによりフォトダイオードに導いて、検出した結果を電圧として出力させた。

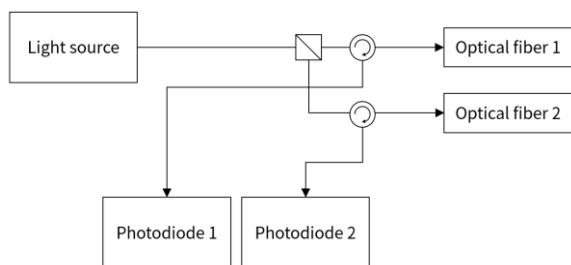


Fig. 3 Equipment configuration of intensity mic.

フォトダイオードの電圧出力  $V$  [V] をオシロスコープにより記録した。得られたデータを FFT にかけて、直流成分  $V_1^{DC}$  と  $V_2^{DC}$ 、交流（今回は 40 kHz）成分  $V_1^{AC}$  と  $V_2^{AC}$ 、交流成分の位相  $\varphi_1^{AC}$  と  $\varphi_2^{AC}$  を取得した。このと

き、式 (4) に代入すべき  $A$  と  $\varphi$  は 2 本のマイクによる測定値の振幅の平均と位相の差として、それぞれ次式で与えられる。ここで  $\alpha$  [Pa] は光ファイバマイク [3] において音圧の算出に使用する係数（空中では  $\alpha = 1.02 \times 10^8$  Pa）である。

$$A = \alpha \times \frac{1}{2} \left( \frac{V_1^{AC}}{V_1^{DC}} + \frac{V_2^{AC}}{V_2^{DC}} \right) \quad (5)$$

$$\varphi = \varphi_1^{AC} - \varphi_2^{AC} \quad (6)$$

### 3.3 測定結果

マイク間隔  $\Delta r$  を最小値 0.2 mm から 0.5 mm 刻みで 10.2 mm まで変化させ、各条件一回ずつ計測した結果を Fig. 4 に示す。

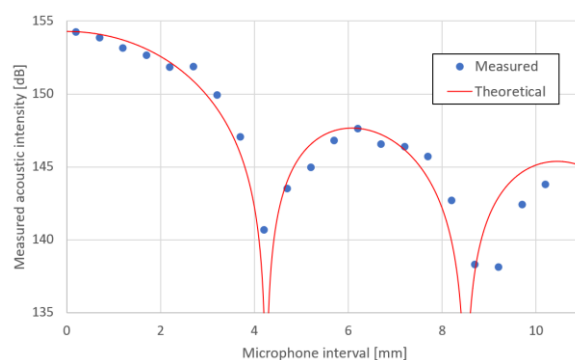


Fig. 4 Experimental results on mic. interval

音響インテンシティの計測値は  $\Delta r$  の sinc 関数に従うことが理論から導かれており [1]、その影響が 1 dB 以内に収まるマイク間隔は 40 kHz の場合 1.6 mm 未満と計算される [2]。計測値と  $\Delta r = 0.2$  mm で一致する理論値の曲線を Fig. 4 に表示している。

## 4 おわりに

本稿では超音波を対象とした P-P インテンシティマイクを提案し、試作機による実験を行った。多少のズレは見られるものの計測値はおおむね理論値と同様の傾向を示し、提案手法の妥当性が確認された。

今後、実用に適したプローブ構造や、複数方向の音響インテンシティを計測できる構造などを検討する予定である。

## 参考文献

- [1] S. Gade, B&K Tech. Review, (3), 3-29, 1982.
- [2] 星, 大岡, 非線形音響研究会, 23-4, 2023.
- [3] 大岡, 星, 音講論 (秋), 1-7-5, 2021.
- [4] 星, 大岡, 信学技報, 122 (36), 6-7, 2022.