

超音波フェーズドアレイが生成する音場の観察方法に関する一考察 第二報 光ファイバによる音響インテンシティの測定

星 貴之, 大岡 佳生

ピクシーダストテクノロジー株式会社 〒101-0061 東京都千代田区神田三崎町 2-20-5

1 はじめに

空気中を伝搬する強力超音波の応用開発が進められている。特に超音波フェーズドアレイ [1] はデバイスから離れた位置に超音波焦点を形成することができ、また日常生活に近いところでの使用が想定されることから、生成される音場を観察して把握するための簡便な方法が求められている。

水中において超音波パワーを計測する方法としては、天秤法が主流である。そこでは強力な超音波による熱的損傷に加えて、音響流に起因する問題も生じている [2]。空中における非接触触覚提示の用途でも音響放射圧と音響流の両方が知覚される [3] など無視できない大きさの音響流が生じており、電子秤で測定する際にも値が揺らぐことが報告されている [4]。放射圧を正確に測定するためには、音響流から分離する必要がある。

前稿 [5] において、超音波フェーズドアレイが生じる音場の空間分布、および放射圧と音響流の観察方法を俯瞰した。既存の観察方法では放射圧と音響流は混ざって観察されやすく、独立して検出するには工夫が必要であることを指摘した。

音響放射圧は、音波の伝搬が物体によって遮られたときに生じる単位面積当たりの応力である。これは音響インテンシティに比例することから、物体が存在しないときにそれを測定することにより、物体が存在するときの放射圧を推定することができる。

本稿では、超音波フェーズドアレイで使用される 40 kHz 空中超音波の音響インテンシティを音響流の影響なしに測定することを目指して、光ファイバを用いた測定法を提案する。

2 音響インテンシティの測定法

音響インテンシティは 2 本のマイクロホンを近接配置することで測定できる [6]。音響インテンシティの r 方向成分 I_r [W/m²] 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。

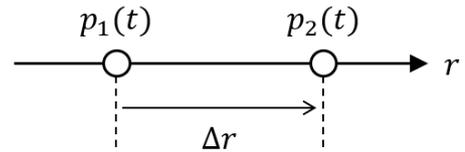


図 1 マイクロホンの配置

$$I_r = \overline{p(t) u_r(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) u_r(t) dt \quad (1)$$

ここで T [s]、 t [s] は時間である。運動方程式より

$$\rho \frac{\partial u_r}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad (2)$$

であることから、粒子速度は次式で表される。

$$u_r = -\frac{1}{\rho} \int_0^t \frac{\partial p}{\partial r} dt \quad (3)$$

ここで ρ [kg/m³] は空気の密度である。 r 方向に間隔 Δr [m] だけ隔てて配置された 2 本のマイクロホン (図 1) が測定する音圧を p_1 および p_2 とすると、音圧と粒子速度は次式によって近似される。

$$p(t) \approx \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \quad (4)$$

$$u_r(t) \approx -\frac{1}{\rho \Delta r} \int_0^t [p_2(\tau) - p_1(\tau)] d\tau \quad (5)$$

ここで τ [s] は時間である。式 (4) および (5) を式 (1) に代入することによって次式が得られる。

$$I_r \approx \frac{1}{2T\rho\Delta r} \int_0^T \left\{ [p_1(t) + p_2(t)] \int_0^t [p_1(\tau) - p_2(\tau)] d\tau \right\} dt \quad (6)$$

すなわち 2 本のマイクロホンの平均と差分から音響インテンシティを近似的に得ることができる。

3 マイクロホン間隔の影響

前節の測定法はあくまで近似値であり、マイクロホン間隔に依存して真値からの乖離が生じる。単一周波数の信号を想定すると、音響インテンシティの真値 I_r と近似値 \hat{I}_r の関係は次式で表される [6]。

$$\hat{I}_r = I_r \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} \quad (7)$$

ここで k [rad/m] は波数である。すなわち真値に対

して sinc 関数の分だけ小さい近似値が得られる。

近年応用開発が進められている超音波フェーズドアレイは主に 40 kHz の超音波を利用している。近似値の真値からの乖離が 1 dB 以内に納まるマイクロホン間隔は次式で与えられる。

$$k\Delta r < 1.15 \quad (8)$$

40 kHz 超音波の場合、条件を満たすマイクロホン間隔は 1.6 mm 未満と計算される。

4 光ファイバマイクの採用

筆者らは光ファイバを用いたマイクロホンを製作し、40 kHz 超音波に対してほぼ無指向性（全周囲に対して -1 dB 以内）であることを確認している [7]。ここで用い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であり、その先端 1 cm 程度で直径 0.125 mm の芯線を露出させたものである。実際の使用時には直径 0.9 mm の金属ワイヤーで固定するため、もっとも太い部分で 1.8 mm 程度となる。

超音波測定用の市販のマイクロホンは直径 1/4 インチ (6.35 mm) や 1/8 インチ (3.175 mm) のものがあるが、これらを平行に並べた場合、音響インテンシティを測定するために必要なマイクロホン間隔 1.6 mm 未満を達成できない。またマイクロホン同士を対向させた配置にすると、マイクロホンプロンプが超音波の音場を乱してしまうため正確な測定は困難である。

一方、光ファイバマイクは間隔 0.9 mm で並べることが可能であり、1.6 mm 未満という条件を満たすことができる。さらに 40 kHz 超音波に対してほぼ無指向性、すなわちほぼ音場を乱さないことから測定の正確性が期待できる。

光ファイバを 2 本使用して音響インテンシティを測定するための機器構成を図 2 に示す。現在、この構成で試作したデバイスを用いて基礎データの収集を進めている。

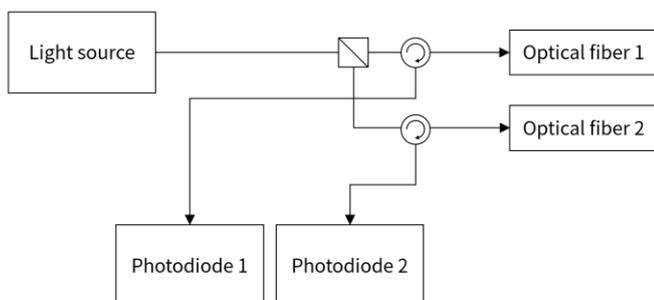


図2 光ファイバによる音響インテンシティ測定の機器構成

5 音響放射圧との関係

冒頭で述べた通り、超音波の音響インテンシティを測定する目的は、物体が存在するとき生じる音響放射圧を推定することであった。放射圧 P_r [Pa] は、音響インテンシティ I_r を音速 c [m/s] で割ることによく近似され [8]、次式で表される。

$$P_r = 2 \frac{I_r}{c} \quad (9)$$

ここで 2 は物体表面での全反射を表す係数である。

6 音響流との関係

超音波フェーズドアレイの焦点付近で発生している音響流は、正確な測定ではないが高々 10 m/s と考えられる [4]。音響流により音速 $c = 340$ m/s が見かけ上増加したとき、波数 k は見かけ上減少する。すなわち k がもともと式 (8) の条件を満たしていれば音響流が存在する場合にも式 (8) を満たすため、近似値の真値からの乖離 1 dB 以内で音響インテンシティを測定することができる。

7 まとめ

超音波フェーズドアレイによって生じる音響放射圧を音響流の影響なしに測定することを目的として、光ファイバによる音響インテンシティの測定法を検討した。そこで要求される間隔 1.6 mm 未満という条件を、直径 0.9 mm の光ファイバをマイクロホンプロンプとして用いることによって満たすことができる。

今後、試作デバイスを用いて測定の安定性や理論値との比較などにより、提案手法の検証を行う。

文献

- [1] 星貴之: 非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発, 計測自動制御学会論文集, vol. 50, no. 7, pp. 543-552, 2014.
- [2] 菊池恒男: 超音波計測技術における計量標準と工業標準, 日本音響学会誌, vol. 64, no. 2, pp.98-103, 2008.
- [3] S. Mizutani, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda: Thresholds of Haptic and Auditory Perception in Midair Facial Stimulation, Proc. IEEE International Symposium on Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE), 2019.
- [4] 星貴之, 大岡佳生: 強力振動子を用いた超音波フェーズドアレイの開発, 電子情報通信学会技術研究報告 (超音波研究会 (US)) (共催: 非線形音響研究会), vol. 122, no. 36, pp. 6-7, 2022.
- [5] 星貴之: 超音波フェーズドアレイが生成する音場の観察方法に関する一考察, 非線形音響研究会資料, 22-2, 2022.
- [6] S. Gade: Sound Intensity (Part I. Theory), Brüel & Kjær Technical Review, no. 3, pp. 3-29, 1982.
- [7] 大岡佳生, 星貴之: 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, 日本音響学会 2021 年秋季研究発表会講演論文集, 1-7-5, 2021.
- [8] K. Beissner: Acoustic Radiation Pressure in the Near Field, Journal of Sound and Vibration, vol. 93, pp. 537-548, 1984.