

レーザービームの偏向に基づく光散乱体を含む水中の音場計測

棚瀬 勇介[†] 黒山 喬允[†] 水谷 孝一^{††}

[†] 岐阜高専 電子制御工学科

^{††} 筑波大学システム情報系

1. はじめに

産業界に幅広く活用されている超音波洗浄機の特性解明に超音波場の測定は不可欠である。超音波測定に広く用いられるハイドロホン、高い音圧下では耐久性に問題があるうえ、挿入することで音場に対して影響を及ぼす。非接触かつ音場の瞬間音圧を計測する手法は光偏向法を適応して研究されてきたが、[1] 音響キャビテーションなど水中の光散乱体の影響を考慮していない。そこで本研究では、水中の光散乱体が提案手法による計測に及ぼす影響をシミュレーションによって検討する。

2. 計測原理

提案手法では図 1 に示すように $(2N+1) \times (2N+1)$ 個の格子状にレーザービームを入射し、それぞれのビームのレンズ焦点面における偏向量から各地点での音圧 $p(x,y,z)$ を計測する。ビームの x, y 方向の変位 δ_x, δ_y はそれぞれ音圧の x, y 方向微分に比例する。 $p(x,y,z)$ の z 方向への投影 p_z を

$$p_z = p_z(x,y,t) = \int_S p(x,y,z,t) dz \quad (1)$$

とすれば、 δ_x, δ_y は i 行 k 列における x, y 方向の微分係数を差分近似して次式で与えられる。

$$\delta_x^{i,k} \approx \gamma DS(p_z^{i,(k+1)} + p_z^{(i+1),(k+1)} - p_z^{i,k} + p_z^{(i+1),k}) / (2L), \quad (2)$$

$$\delta_y^{i,k} \approx \gamma DS(p_z^{(i+1),k} + p_z^{i,(k+1)} - p_z^{i,k} + p_z^{i,(k+1)}) / (2L). \quad (3)$$

ここで γ, t, D, S, L はそれぞれ音響光学定数、時間、音場から測定面までの距離、音場の幅、レーザの間隔である。 D, S, L が既知かつ変位 $\delta_x^{i,k}, \delta_y^{i,k}$ が計測によって得られれば Eqs.1,2 から最小二乗解として $p(x,y,t)$ を計算できる。 [2]

3. シミュレーション

2次元球面波音場を仮定し、音圧の瞬時値を、

$$p_z(x,y,t) = \frac{r_0 p_0 S}{\sqrt{x^2 + y^2}} \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} \sqrt{x^2 + y^2}\right), \quad (4)$$

と設定した。ここで $x' = x + 20$ mm, $y' = y + 14$ mm, $r_0 = 2$ mm である。 $x'^2 + y'^2 = r_0^2$ の音圧 p_0 を 50 kPa, 音響光学定数 γ を 1.47×10^{-10} Pa⁻¹ とした。音波長 Λ は 10 mm である。

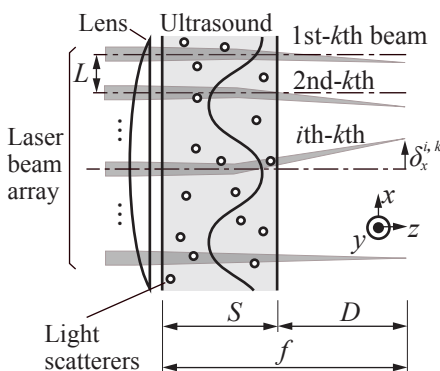


図 1. 光偏向法を用いる瞬時水中音場計測系。

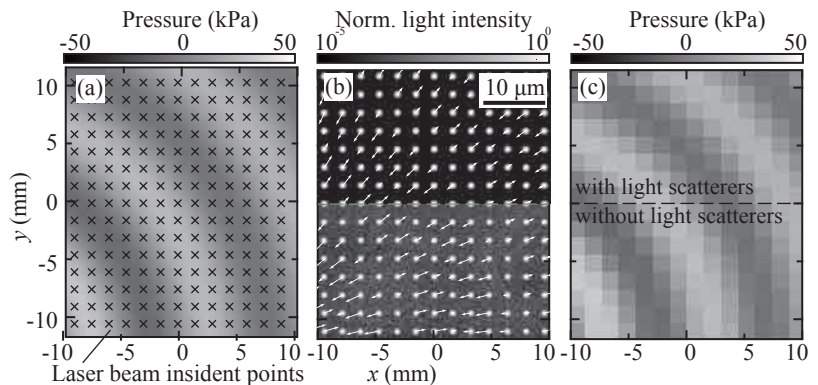


図 2. 解析結果(a)設定音場 (b)レンズ焦点面の光強度(c)提案手法で求めた音場。

レンズ焦点面に収束する波長 $\lambda = 640$ nm のレーザービームアレイは、音場によって $\exp[j\gamma 2\pi/\lambda p_z(x,y,t)]$ の位相変調を受け、球型の光散乱体を模擬したランダムに分布する直径 75 μ m の円形相補開口によって遮蔽されるものとした。遮蔽によってビームの平均的な透過率は 98%となる。レーザービームは直径 0.8 mm のガウシアンプロファイルとし、 15×15 のアレイを形成する。レンズの焦点距離は 300 mm であり、レンズ焦点面の光強度は $14.8 \times 14.8 \mu\text{m}^2$ の画素寸法を持つ撮像素子で計測することを仮定した。音場からの出射光は距離 $D = 250$ mm 伝搬するものとし、伝搬解析には角スペクトル法を用いた。

図 2.(a)に設定した音圧を示す。図中にはレーザービームの入射点も示した。図 2.(b)にレンズ焦点面の光強度を示す。光散乱体が存在する条件では、散乱体によるレーザービームの回折によって背景の光強度が増加していることがわかる。しかしながら、レーザービームスポットは明瞭に形成されており、図中に矢印で示したレーザービームの変位も光散乱体がない条件と比べて大きな差は見られない。図 2.(c)にレーザービームの変位から求めた音圧 \hat{p}_z を示す。光散乱体の有無にかかわらず、真値に近い値を得ることができた。次式で与えられる信号対雑音比 SNR も光散乱体を含む音場においても従来と等しい 21.8 dB を確認できた。

$$SNR = -10 \log_{10} (|\hat{p}_z - p_z|^2 / \sum |p_z|^2). \quad (1)$$

以上から、よって提案手法は光散乱体を含む場合でも、レーザービームスポットが明瞭に見られる条件では 10 kPa オーダの計測が可能であることがわかった。

5. まとめ

シミュレーションにより、光偏向法による光散乱体を含む水中音圧計測方の検討を行った。その結果、光散乱体の数密度が低くレーザの透過率が比較的高い条件においては 10 kPa オーダ音圧計測が可能であることがわかった。

参考文献

- [1] 黒山喬允ら: 音講論 2016 年春 (2016) 1163.
- [2] W. H. Southwell: J. Opt. Soc. Am. **70**(1980) 99.