

偏光高速度干渉計を用いた 水中音波の可視化と水温非侵襲計測

Visualization of underwater sound wave and non-invasive measurement
of water temperature using high-speed polarization interferometer

1w173139-3 吉田 颯汰 指導教員 及川 靖広 教授
YOSHIDA Souta Prof. OIKAWA Yasuhiro

概要：水中の音波の計測は、医療用トランスデューサの特性評価など様々な場面で行われているが、多くの場合が非定常な音場である。水中の音波の測定は一般的にハイドロホンを用いて行われるが、扱いに注意が必要であることや高価であること、音場が乱れる恐れがあるという問題がある。一方で、近年音場の新たな計測法として提案されている偏光高速度干渉計を用いた音場の計測は、非定常音場の非接触計測が可能である。そこで本研究では、偏光高速度干渉計を用いた水中の音波の可視化を提案し、提案手法での水中音波の可視化可能であることを確認した。またその応用として、水温の非侵襲計測法を提案し、現状 $\pm 0.5 \sim 1.5$ °C 程の精度で同定できることを確認した。

キーワード：偏光高速度干渉計，水中，光学計測，可視化計測，水温非侵襲計測

Keywords: high-speed polarization interferometer, underwater, optical metrology, visualization metrology, water temperature non-invasive measurement.

1. まえがき

近年音場の新たな計測法として偏光高速度干渉計を用いた音場の計測が提案されている。偏光高速度干渉計は、音場に光を照射し音波の情報を得るため、計測音場に非接触に計測が可能であり、音場を乱さず、また瞬時に非定常音場の計測が可能である。一方で、水中の音波の計測は、医療用トランスデューサの特性評価や生物鳴音測定など様々な場面で行われている。これらの多くの場合が、非定常な音場であり、最近では時間とともに測定環境が変化する音場での計測が求められている。水中の音波の測定は一般的にハイドロホンを用いて行われるが、扱いに注意が必要であることや高価であること、音場が乱れる恐れがあるという問題がある。偏光高速度干渉計を用いた音場の計測は、水中の音波の計測においても有効であると考えられる。そこで本研究では、偏光高速度干渉計を用いた水中の音波の可視化可能性を検証した。

また、応用としてその可視化データから水温の非侵襲計測への応用を考えた。最近では、温度把握の中でも、液体中の非侵襲計測による温度把握のニーズもある [1]。そこで本研究では、偏光高速度干渉計を用いた物体内部温度の非侵襲計測の妥当性を検証した。

2. 偏光高速度干渉計

媒質の屈折率と密度は Gladstone-Dale の式で関係性が示されるが、これは、液体の場合にも適用可能である。また、光の位相と媒質の屈折率は

$$\phi(\mathbf{r}, t) = k \int_L n(\mathbf{l}, t) d\mathbf{l} \quad (1)$$

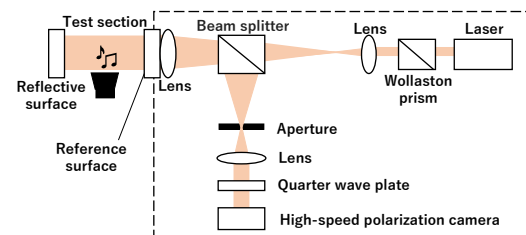


図-1 偏光高速度干渉計の概略

表-1 空気中および水中の各パラメータ

項目	空気 (20 °C)	水 (20 °C)
音速 [m/s]	344	1482
密度 [kg/m ³]	1.204	998.2
比熱比	1.4	1.0
屈折率	1.000	1.333

で記述される。ただし、 ϕ は光の位相、 \mathbf{r} は位置ベクトル、 t は時間、 k は光の波数、 L は光路を表す。よって、媒質の密度変化の情報が光の位相に含まれていると言える。光による音場計測の原理を考える。光の位相と音圧の関係は、

$$\phi(\mathbf{r}, t) = k \int_L d\mathbf{l} + k \frac{n_0 - 1}{\gamma p_0} \int_L p(\mathbf{l}, t) d\mathbf{l} \quad (2)$$

で記述される。ただし、 p は音圧、 p_0 は静止して平衡状態にある媒質の圧力、 n_0 は媒質の屈折率、 γ は媒質の比熱比を表す。式 (2) から、光の位相を観測することで音圧の情報を得られることが分かる。偏光高速度干渉計の概略を図-1 に示す。詳しいシステムの詳細は参考文献 [2] を参照されたい。

空気中と水中におけるそれぞれのパラメータの違いを

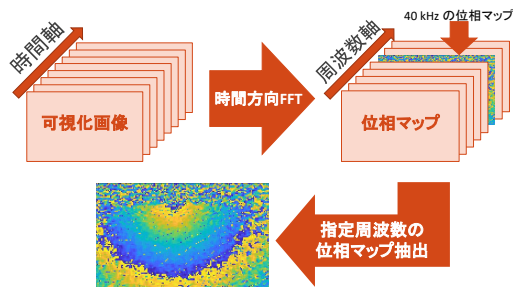


図-2 位相マップ取得

表-2 測定条件

フレームレート [fps]	100,000
撮影範囲 [mm]	56 × 94
1 ピクセルの長さ [mm]	0.595
音源中心周波数 [kHz]	40 ± 1
水槽 [mm]	H360 × W600 × D300
材質	クリアガラス (5 mm)
水温 [°C]	26.5

表-1 に示す。

3. 水温の非侵襲計測方法

偏光高速度干渉計を用いて測定で得られる可視化データから、位相マップを取得する流れを図-2 に示す。

図-2 のうち、音源の中心と思われるピクセル列の位相情報を用いて求めた近似直線の傾きが、1 ピクセルあたりの平均的な位相差を表す。位相差と時間差の関係は、 $T_0 = \varphi / 2\pi f$ で記述される。ただし、 T_0 は時間差、 φ は位相差、 f は音源の中心周波数を表す。また、液体中の音速 V は、 $V = L_0 / T_0$ で記述される。ただし、 L_0 は距離を表す。ここで、音速と水温の関係式を用いることで、求めた音速から水温が同定できる。今回の同定には、Medwin の音速式を用いた [3]。

4. 水中の音波の可視化実験

偏光高速度干渉計を用いて、水中の音波の可視化可能性を検証した。実験条件を表-2 に示す。音源には、防滴型の超音波センサを用いた。実験状況と計測領域の見方を図-3 に示す。水中の音波の可視化画像を図-4 に示す。計測時間は 5ms とし、可視化画像は、撮影データを光の位相計算後、各ピクセルの時間方向データに対して中心周波数 40 kHz とするバンド幅 500 Hz のバンドパスフィルタを適用した。実験により、水中の音波が可視化可能であることを確認した。

5. 水温同定結果

次に、水温の同定結果を示す。同定には、3 回に分けて別温度での実験を行った際の水中の音波の可視化データを用い、データから抽出した周波数 40 kHz の位相マップの音源の中心のピクセル列の位相情報を用いた。音速と水温の実測および同定結果を表-3 に示す。提案手法では、現状、実測結果と同定結果の誤差が、 $\pm 0.5 \sim 1.5$ °C 程の精度で同定できることを確認した。

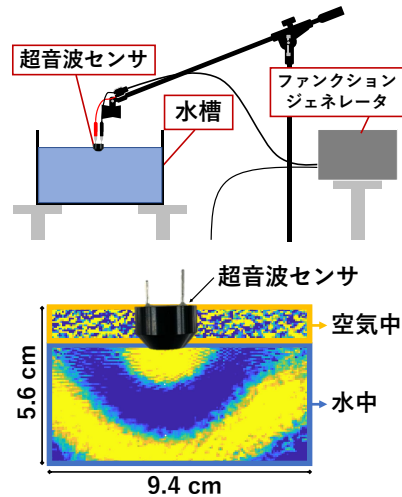


図-3 実験状況と計測領域の見方

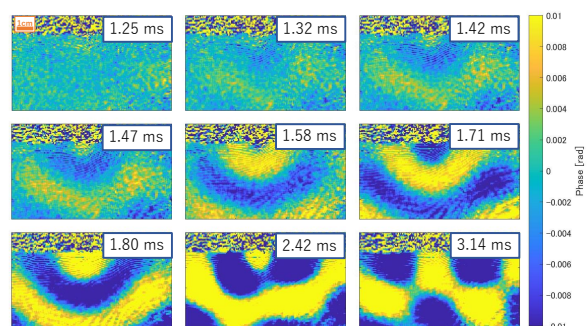


図-4 水中音波の可視化画像

表-3 水温と音速の実測および同定結果

実測結果		同定結果	
音速 [m/s]	水温 [°C]	音速 [m/s]	水温 [°C]
1500.4	26.5	1502.8	27.4
1478.8	19.2	1475.4	17.7
1468.9	16.2	1470.5	16.6

6. むすび

本研究では、水中の音源の新たな非接触計測法の提案を目的とし、偏光高速度干渉計を用いた水中の音波の可視化可能性を検証した。提案手法で可視化が可能であることを確認した。またその応用として、水温の非侵襲計測法を提案し、現状 $\pm 0.5 \sim 1.5$ °C 程の精度で同定できることを確認した。今後は、より精密な実験を行い、超音波センサ以外の水中音源からの音波の計測や、更に高い精度での水温の同定、温度変化がある場での水温計測についても考えていきたい。

参考文献

- [1] 高橋学, 井原郁夫, 渡辺弘和, 阿部将典, “超音波とレーザーを併用した水温の非侵襲計測,” 非破壊検査, vol.67, no.9, 2018.
- [2] K. Ishikawa, K. Yatabe, N. Chitanont, Y. Ikeda, Y. Oikawa, T. Onuma, H. Niwa, and M. Yoshii, “High-speed imaging of sound using parallel phase-shifting interferometry,” Opt. Express, vol. 24, pp. 12922-12932, 2016.
- [3] Robert J. Urick, Principles of underwater sound, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983.