

レーザー光をプローブとして用いる超音波音場観測

今野和彦

秋田大学大学院工学資源学研究科 〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1

Laser Probing Method for Focused Ultrasonic Field

Kazuhiko IMANO

Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-cho, Akita 010-8502

This paper describes an observation method of focused ultrasound field for a gutter type piezo-ceramic transducer using light deflection method. Laser beam light modulated and deflected by the ultrasonic wave is received with an avalanche photo diode module and is fed to the vector signal analyzer to obtain the modulated components of amplitude and phase of sound information. Phase unwrapping is executed to construct the continuous phase variation. Moreover, phase change components as the sound propagation is removed to obtain the phase change of the ultrasound around the focal point are observed. Phase anomaly, inversion of pressure polarity, is clearly observed.

Key words: light deflection method, ultrasound field, focused ultrasound wave, phase wrapping

1. はじめに

圧電振動子から水中などに放射される超音波の音場は、これを利用した計測や画像などの精度、画像の質に大きな影響を与える。特に集束超音波を利用した計測では、集束超音波の焦点における音圧や位相の特性は、計測および画像システムの性能を左右する重要なファクターとなり得る。集束超音波音場の観測は、シュリーレン法などの光学的な方法と、ニードルタイプのマイクロホンを音場中で走査して音圧の情報を得るといった音響的な方法に大別できる。前者は音波による光の回折現象を用いる方法で、音圧の情報を間接的に得られるが、一般に位相情報は得られない。後者は直接的に音圧情報が得られるが、マイクロホンの測定箇所への設置に伴う音場の乱れ、受波面の寸法が有限寸法であることによる回折効果や、受波素子が音場媒質と異なることから音波の反射や位相シフトなどが生じるため、音波の集束に伴う位相変化とその空間分布を高精度で測定することは容易でない。

本論文で述べる方法は光学的な方法に属するものであるが、音波による光の偏向特性から音場を観測するものであり、マイクロホンで起こる問題がなく、レーザー光のスポットサイズ程度の高い空間分解能が得られる特徴があ

る。以下では、集束音場の観測を例としてとりあげ、音圧と位相両方の情報が得られることを示してその妥当性を明らかにする。

2. 超音波音場について

音源から音場媒質中に放射される平面音波 p_a は、指数表示を用いて、一般に

$$\begin{aligned} p_a &= P_0 \exp [j(\omega_p t - k_p z + \varphi_i)] \\ &= P_0 \exp [j(\omega_p t - 2\pi z/\Lambda + \varphi_i)] \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。上式で、 P_0 は音圧振幅、 j は虚数単位、 ω_p は音波の周波数、 k_p は音波の波数、 z は伝搬方向の座標、 φ_i は初期位相および Λ は音波の波長である。音波の振幅および位相は時間と伝搬距離によって変化する。

上式で、位相は伝搬距離 z が音波長 Λ の整数倍ごとに 2π だけ変化し、完全な平面波の場合、時間の要素を除けば、これ以外に位相変化の要因はない。多くの実験で用いられる音源は有限の大きさであり、平面波とみなせなくなる場合は、回折の影響で音波の位相が変化する。例えば半径 a の音源の場合は、 $z < a^2/\Lambda$ と $z > a^2/\Lambda$ の場合をそれぞれ近距離音場および遠距離音場と定義することが多く、その場合、音波の位相は遠距離と近距離で $\pi/2$ 異なることが知

られている¹⁾。すなわち、近距離領域では音圧は音源の振動速度に比例し、遠距離領域では音波の位相が $\pi/2$ 進むため加速度に比例するようになる。通常、連続波ではこの測定が難しく、パルス波を用いてその波形変化から位相変化を推測することが多い。一方、本論文で取り上げるような凹面集束音源から放射される集束音波は、位相変動に関して平面音源とは異なり複雑で²⁾、数値解析例¹⁾はあるが、マイクロホンなど音響的な方法による観測が難しく、報告例が少ない状況にある^{2,3)}。凹面集束音波の場合、音圧は音源である凹面の幾何学的焦点付近で最大値をとる。一方、位相については焦点での観測が難しく、焦点の前と後で焦点から数十波長程度離れた2点でパルス波の音圧極性が反転していることから、位相変化が確認できる²⁾。しかしながら、焦点付近では音圧波形が音源の振動の加速度に比例し、波形が速度波形の微分した形に変化し、これに凹面による音波の集束の効果で波形の振幅も変化する。このため、マイクロホンを用いた観測では両者の区別ができず、位相変化の明確は判別できない²⁾。これは、多くの音場観測用マイクロホンの受波面に用いられる圧電素子の寸法が波長よりも十分小さくないため、受波面で音圧および位相が“平均化”されることが位相測定を困難にする要因のひとつと考えられている。これに対して筆者は、楕型凹面集束音源の音場について、光学的な方法である差分シャドウグラフ法⁴⁾によって音波の伝搬に伴う位相観測を行っており、波面の分布から焦点付近で位相の“とび”が観測できるが音圧と位相変化の様子を詳細かつ定量的に求めることはできないことを明らかにしている。以下では、音波の位相変化を、レーザー光をプローブとして観測する方法の原理とシステムについて述べる。

3. 測定原理

3.1 音波による光の偏向

Fig. 1 のように波長 Λ の音波の伝搬方向と垂直にレーザー光を入射させるとき、レーザービーム径が音波の波長と比べて十分小さい場合、音波によって生じる空間的に分布する屈折率勾配中を光が通過するため、レーザー光は音波により偏向させられる⁵⁾。その偏向角 Φ は、

$$\sin \Phi = \frac{2\pi L}{\Lambda} \left(\frac{dn}{dp} \right) p \quad (2)$$

のように表される。上式で p は音圧、 L はレーザー光が通過する音波の幅、 dn/dp は音波による屈折率変化であり、水中での値は $1.47 \times 10^{-10} [\text{Pa}^{-1}]$ が知られている⁵⁾。上式から光の偏向角 Φ を測定すれば音圧 p が求められる。本論文では、後述の測定方法にあるように、偏向角 Φ を測定せ

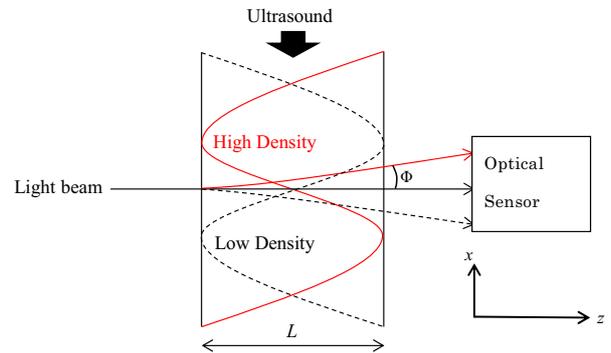


Fig. 1 Light deflection by the sound pressure.

ずに単一の光センサーでレーザー光を受光して音圧および位相の測定を行う方法を用いる。

3.2 音波による光の位相変動

レーザー光をプローブビームとして、音波の位相変動作用によって生じる光回折波を超音波が存在する音場中を交差するように伝搬させるとき、得られる光波強度分布の式には、音波の影響を受けない透過光に対応した直流成分や音波による一次回折波成分などが含まれるが、音波による位相変動成分を $\Delta\phi_0$ として位相変動度が $\Delta\phi_0 \ll 1$ のときに、観測面での一次成分の信号強度分布 I_{ac} は

$$I_{ac} = I_0 \Delta\phi_0 [\exp\{-u^2 + (u - \theta)^2\}] \sin \omega_p t + \exp\{-u^2 + (u + \theta)^2\}] \sin \omega_p t \quad (3)$$

となる⁶⁾。ここで、 I_0 はレーザー光強度分布、 $u = x_f/w_f$ は音波で位相変動されたレーザー光の観測面すなわち信号観測のための光センサーの受光面での規格化された x 座標、 $\theta (= k w_0/2 = \pi w_0/\Lambda)$ は規格化波数、 w_f は光センサー面でのビームサイズ、 (ω_p, k_p) は音波の角周波数および波数、 w_0 は音波入射領域でのレーザースポットサイズ ($\cong w_f$) である。さらに、 $\theta \ll 1$ 、すなわちレーザー光のビームスポットサイズが音波長 Λ に比べて小さい場合、式 (3) は以下のように表すことができる。

$$I_{ac} = I_0 \Delta\phi_0 e^{-2u^2} u \theta \sin \omega_p t \quad (4)$$

上式は、 $u = 1/2$ または $x = w_f/2$ で光信号強度が最大になり、強度は音波の周波数 f_p に比例することが知られている。また、光信号のピーク座標は周波数によらないため、複数の周波数成分があってもピークは同じ位置に現れる。式 (3) からわかるように、光信号強度は音圧の正負に対応して規格化座標 u の正負の位置、すなわち x 座標に対称に現れるため、これらを含む信号を同一のセンサーで検出すれば、複数の周波数からなる音波であってもそのまま検出することができる。園田らはこの性質を利用し、周波数による感度補正を行って光マイクロホンとして実用している⁶⁾。

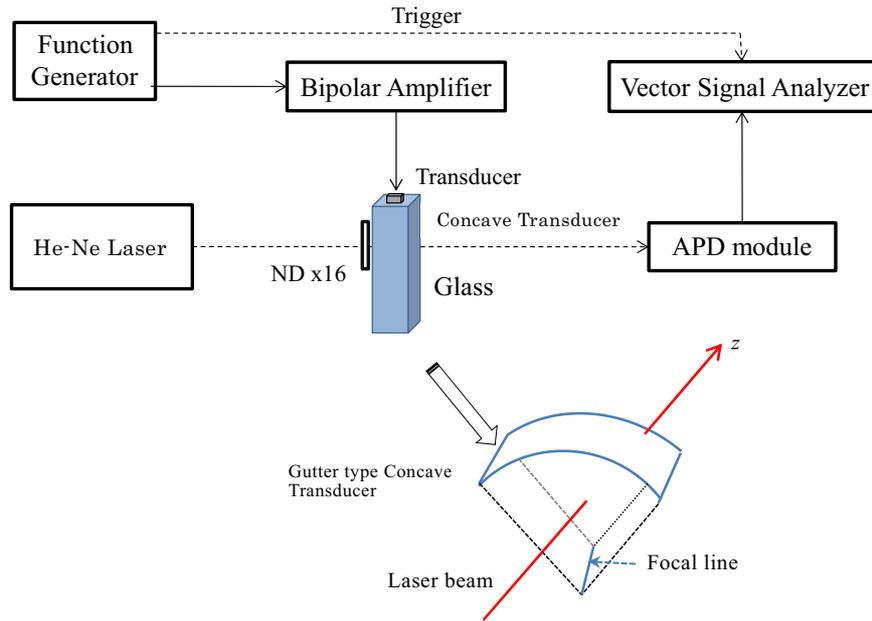


Fig. 2 Experimental set-up.

本論文では、レーザー光をプローブとして用い、位相変調を受けていない透過波と位相変調波を同一の光センサーの受光面で同時に受光してこの信号から振幅と位相情報を抽出するもので、同じ光偏向法を用い、偏向角 ϕ を測定する文献⁵⁾とは異なる方法を用いて音場の観測を行う。

4. 測定方法とシステム

前章で述べたように、音波による光の偏向は規格化 x 座標 u に対して対称 (Fig. 1 では上下位置) に現れることから、位相変調された光信号を測定すれば、音波による偏向の情報が得られる。ここで、偏向角 ϕ について検討する。後述の実験のように、水中での音速を 1500 m/s、音波の周波数を 1 MHz とすれば、その波長 λ は 1.5 mm となる。また、音圧を 100 kPa (≈ 1 気圧)、音波の幅 L を 5 mm として偏向角 ϕ を計算すれば、 $\phi = 0.018$ deg となる。例えば、音波の伝搬路から 10 cm 離れた位置で、偏向によるレーザー光の x 方向の変位は $31.4 \mu\text{m}$ となり、用いるレーザー光のスポット径 ($w_0 \approx w_f = 50 \mu\text{m}$) がこれより大きい場合や近い場合、変調を受けていない透過光と変調された成分が重なり分離できないため、これを精度よく測定することは容易ではない。本論文では、音波による位相変調を受けていない成分である透過光 ($\phi = 0^\circ$) と位相変調を受けた成分を同じ受光素子で受光し、位相変調を受けていない直流成分である透過光を高域フィルター (エヌエフ回路ブロック: NF3628) で除去し、位相変調成分のみを抽出する。Fig. 2 は測定システムを示している。光源である He-

Ne レーザーからの細いレーザービーム (スポットサイズ径 ($w_0 \approx w_f =$) $50 \mu\text{m}$) は光量調整用の減光フィルター (ND $\times 16$) を通過後、音波の位相変調を受けた後にアバランシフォトダイオード (APD) モジュール (浜松ホトニクス: C5460) で受光される。この光強度信号はベクトルシグナルアナライザー (VSA) (Agilent 社, HP89441A) に入力され、 $p = \sqrt{I_{ac}}$ の処理後に直交位相検波を行う。検波出力の実部 $\text{Re}(p)$ および虚部 $\text{Im}(p)$ のデータから、振幅 P と位相 ϕ は以下のように求められる。

$$P = \sqrt{\text{Re}(p)^2 + \text{Im}(p)^2} \quad (5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(p)}{\text{Re}(p)} \right) \quad (6)$$

音圧および位相情報はレーザー光を測定対象領域でスキャンし、音場内の各位置で式 (5)、(6) を用いて P および ϕ を求める。音圧は、音源の駆動電圧を変化させて同じ位置に置いたニードル型ハイドロホン (東レエンジニアリング社) の出力から式 (5) で求められる APD 出力を校正した。また、式 (1) から明らかであるが、音波の伝搬に伴う位相変化は、波長ごとに規則的に変化する成分を式 (6) で得られるデータから差し引くことにより、伝搬に伴う位相変化以外の位相情報を得る。

5. 実験結果

5.1 音 圧

Fig. 3 に示すように水中に設置された幅 5 mm、長さ 30 mm、曲率半径 30 mm の樋型集束音源 (富士セラミックス

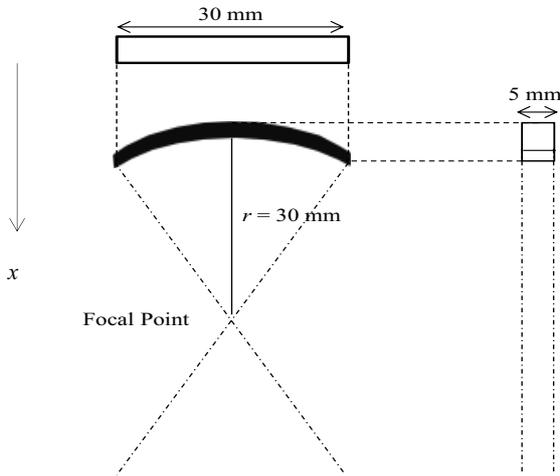


Fig. 3 Gutter type concave ultrasonic transducer.

社, C-9)⁴⁾を用いた。この音源は圧電セラミック素子であり、幅が一定であるため、レーザー光が音波の影響を受ける距離が5 mm一定とみなすことができ、いわゆる“積分効果”⁵⁾がない。この振動子は1.08 MHz、10 V (peak to peak)で連続波とみなせる程度の長さの10波のバースト正弦波電圧で駆動し、焦点を含む中心軸上でレーザー光の

入射位置を移動させてデータを取得した。Fig. 4 (a) は音源の焦点でハイドロホンを用いて観測した音圧波形であり、同図 (b) は音圧波形をフーリエ変換したスペクトルである。この図からわかるように二次高調波 (図中 2nd.) が観測されていないことから、音波の伝搬に伴う非線形性は生じていないものと考えられる。なお、基本波以外の奇数次のスペクトルは音源の共振成分で、音源の性質によるものである。

Fig. 5 (a), (b) は、それぞれマイクロホンおよび APD で受波した焦点での音圧波形を示す。APD の出力波形は音圧波形と一致し、(a) のようにマイクロホンで問題となる電磁的な誘導ノイズがなく、SN 比のよい信号が得られている。Fig. 6 は、マイクロホンで得られる音圧値を横軸に、APD 出力 P を縦軸とした両者の関係で、比例関係があり、この図から APD 出力を校正して音圧値を得ることができる。

5.2 位 相

Fig. 7 および Fig. 8 は APD 出力の振幅および位相の測定結果であり、それぞれ式 (5)、式 (6) に対応している。なお、VSA で得られる位相データは逆タンジェント関数

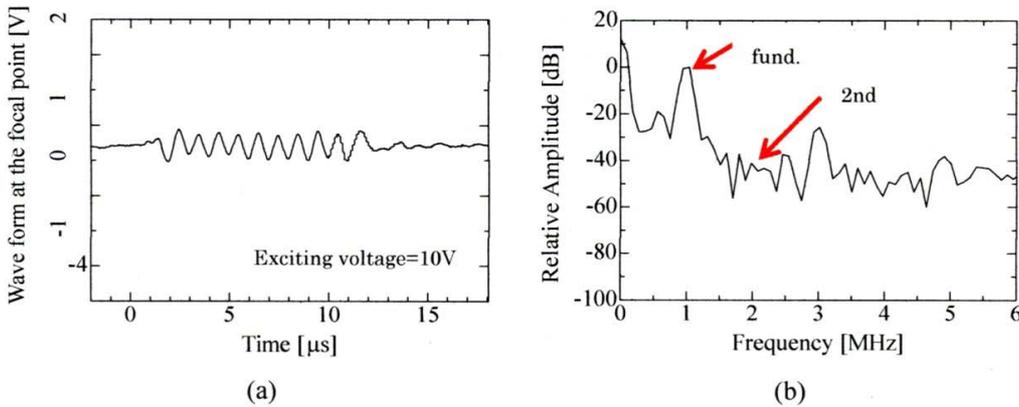


Fig. 4 Exciting voltage (10 cycles of burst voltage wave (a) and its spectrum (b)).

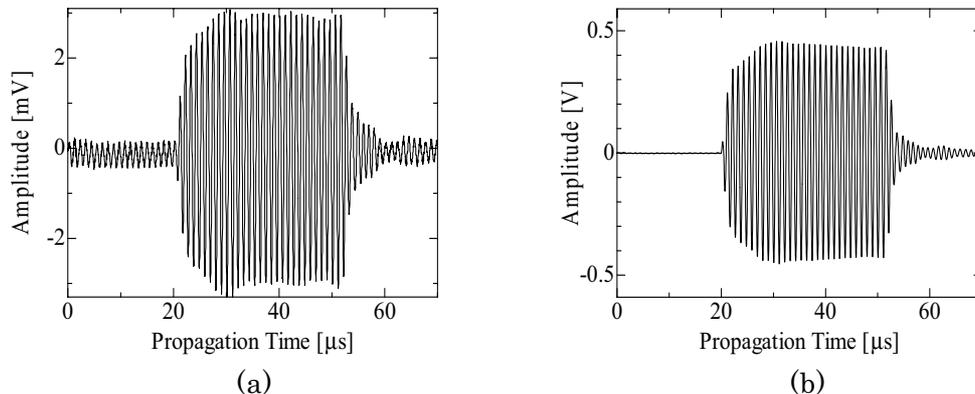


Fig. 5 Sound pressure waveform obtained by hydrophone (a) and APD (b) at the focal point.

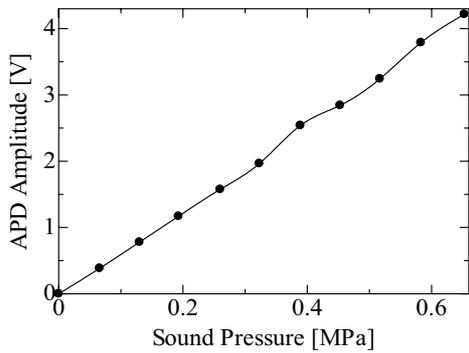


Fig. 6 Relationship between sound pressure and APD output.

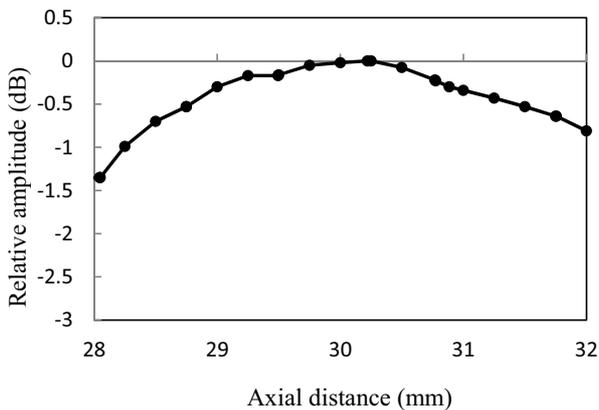


Fig. 7 Sound pressure distribution on the axis of gutter type concave transducer.

($\tan^{-1}(\cdot)$) 演算を行っているが、逆タンジェント関数は周期 π の多値関数であり、通常は $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲の主値を表示するため、上記のようにこの範囲を超えて大きく位相が変化すると、いわゆる位相ラッピングが起こる。このため位相のアンラッピング処理が不可欠である。本システムでは、VSAで得られる位相データの中、音波の周波数である 1 MHz の位相データを読み取り、データを PC に転送する。Fig. 8 からわかるように、音波の伝搬距離が半波長 $\Lambda/2$ ごとに π ずつ変化し、位相がラッピングしていることがわかる。参考のために、Fig. 8 の上部には文献⁴⁾の差分シャドウグラフ法で得られる音源の中心軸付近の音圧分布を切り取ったものを載せている。この図の明暗はそれぞれ音圧のプラスとマイナスを表しており、波面の間隔は一波長に相当し、位相の 2π の変化が波長に一致していることがわかる。このような位相の変化に焦点付近での位相変化が重畳されているが、焦点付近での位相変化が明確にわからないため、位相のアンラッピング処理を行う必要がある。すなわち、Fig. 8 のラッピングした位相データを (図中 ▲ 印) 数波長分程度 (図では 3 波長分) 取得し、半波長ごとに位相データに π を加算して、位相データを連続

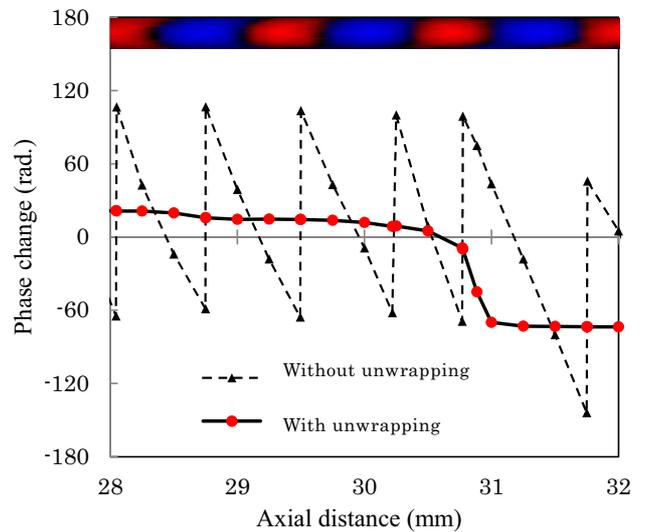


Fig. 8 Phase variation on the axis of gutter type concave transducer. “Color bar” upper side of figure is sound pressure distribution on the axis of transducer obtained by the method of Ref. 4.

したデータに戻す。この場合、位相変化は距離に比例するため、傾きが $-\pi x/\Lambda$ の直線となる。これより伝搬による位相変化を差し引くことによって、音波の伝搬に伴う音波の位相変化が除去できる。図中実線 (● 印) はこの伝搬距離による位相変化の成分を差し引いた結果である。Fig. 7 から、音圧のピークは変換器の幾何学的焦点 ($r = 30$ mm, Fig. 3) 付近で最大となっており、集束の効果が認められる。一方、位相は焦点よりも 1.5 mm (1 波長) 程度後方でその符号がプラスからマイナスへと変化している。すなわち、焦点付近では音波の集束による位相変化が起こり、その結果、位相および音圧極性の反転がこの付近で起こることを示している。この結果はこれまでの報告^{1,2,7-9)}と一致しており、また同じく回折光を用いた観測結果^{4,7)}とも一致しており、本方法の妥当性が確かめられる。本方法では用いるレーザー光のスポット径 (20 μm) の分解能で観測ができるが、これは、マイクロホンを用いる音響的方法では最小でも 0.5 mm 程度であることから、従来法に比べ観測の空間分解能が向上しているためである。Fig. 7 における音圧のピークと位相の反転の位置の相違は、音源の集束利得^{1,9)}の違いによるものと考えられる。文献⁹⁾においては集束利得が小さい場合は音圧のピークが音源側にシフトすることが解析的に示されているが、ほかにこれと比較する実測の方法およびその例がなく、今後、異なる音源形状の実験を行い検討する必要がある。なお、集束域での音圧が高く、主として二次高調波のような非線形成分が存在する場合には、高調波と基本波との重畳により位相変

化は複雑となり，筆者らが提案しているような方法^{4,10)}で基本波と二次高調波を分離して測定する方法が有効と考えられ，今後検討したい。

6. おわりに

光偏向法を用いる際に，音波による光の偏向よりも大きな受光面をもつ光センサーを用い，これから音波の影響を受けない透過光成分を電気的に除去し，超音波によって位相変調された成分に対して直交位相検波および位相アンラッピング処理するという方法によって超音波音場を観測する方法について述べた。この信号からは超音波音場の音圧のみならず位相特性も測定でき，音源の音場観測に有用な方法であることを示した。本方法は水やガラスなどの透明物質に限られるが，高空間分解能を有し，音場を乱さないという特長を生かして，今後種々の形状の音源の音場測定や非破壊試験の際の信号の解釈などに応用したい。

文 献

- 1) 齋藤繁美：電子情報通信学会論文誌 (A), **J91-A-12** (2008) 1108-1115.
- 2) K. Imano, Y. Yoshida and D. Okuyama: J. Acoust. Soc. Jpn. E, **12** (1991) 237-239.
- 3) K. Imano, Y. Yoshida and D. Okuyama: J. Acoust. Soc. Jpn. E, **12** (1991) 233-235.
- 4) K. Imano: IEICE Electron. Express, **11** (17) (2014) 1-6.
- 5) P.-K. Choi: J. Acoust. Soc. Jpn. E, **13** (1999) 209-213.
- 6) 園田義人：音響学会誌, **62** (2006) 571-579.
- 7) H. Miyaki and Y. Watanabe: Jpn. J. Appl. Phys., **38** (1999) 3161-3162.
- 8) B. G. Lucas and T. G. Muir: J. Acoust. Soc. Am., **74** (1983) 1522-1528.
- 9) B. G. Lucas and T. G. Muir: J. Acoust. Soc. Am., **72** (1982) 1289-1296.
- 10) 今野和彦：素材物性学雑誌, **26** (2015) 印刷中.