

令和元年5月29日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12906

研究課題名（和文）シャドウグラフ像を用いた3次元超音波音場の超高速計測手法の開発

研究課題名（英文）High-speed Measurement of 3D Ultrasound Field Reconstructed from Shadowgraph Images

研究代表者

吉澤 晋 (YOSHIZAWA, Shin)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30455802

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：3次元音場を光学的に計測する実験系を構築した。この実験系を用いて、3次元集束超音波音場の光学的計測を行い、光学データから3次元の集束超音波音場を再構成した。また、撮像されたシャドウグラフ像から、音場によって引き起こされた光の位相変化を算出する光伝播数値計算コードの開発を行った。この数値計算により、音場と撮像面との距離が長い条件での音場算出誤差を低減した。さらに、3次元集束超音波音場の光学的直接計測と音場伝播数値計算を組み合わせた非線形超音波音場の計測を行った。従来法よりも高速な3次元音場評価手法を実現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した手法は、超音波トランスデューサ評価で重要な3次元音場測定手法について、従来法である圧力センサ（ハイドロフォン）を3次元走査するのに比べ、計測時間を著しく短縮するものである。光学的測定手法を利用しているため、カメラ画像による2次元情報を瞬時に取得でき、音場の1軸回転によって3次元情報を得ることができる。これにより、超音波トランスデューサ評価にかかる時間を大幅に短縮でき、開発サイクルの短縮が可能となる。また、非接触で音場測定が可能であるため、狭い流路やシャーレ内などのハイドロフォンが挿入できない音場の評価も行うことができる。

研究成果の概要（英文）：An experimental system for the measurement of a 3D ultrasound field reconstructed from optical images was developed. The optical images of a 3D focused ultrasound field were obtained and the pressure field was successfully reconstructed. A simulation code was developed to estimate optical phase modulations by acoustic field from shadowgraph images. The error of the reconstructed pressure when the distance between the acoustic field and the optical measurement plane was relatively long was reduced by the simulation. Furthermore, a 3D ultrasound field was reconstructed using the combination of the optical measurement and numerical simulation where the nonlinearity of ultrasound propagation is considered. The measurement time for a 3D nonlinear ultrasound field was significantly reduced by the combined method.

研究分野：医用超音波

キーワード：音場計測 音響光学効果 シャドウグラフ 集束超音波

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

超音波画像診断は、様々な診断分野において重要な役割を担っており、治療分野では強力な超音波を用いた超音波加熱治療が注目されている。これら医用超音波を発生する機器では、性能および安全性の観点から、超音波の3次元音場の把握が重要である。標準的な音場計測手法は、ハイドロフォンの3次元走査による直接測定である。しかし、ハイドロフォンは1点計測であり、3次元走査による膨大な計測点数を必要とする。そのため、1種類の音場の計測時間が1日～数日と非常に長いことも多い。1つの超音波アレイトランスデューサで様々な超音波強度で様々な音場を生成することができるが、これらを一一つ3次元計測することは現実問題としては非常に困難である。また、治療用超音波の音場計測においては、強力な超音波の照射によってハイドロフォンが損傷することがあり、非接触な計測手法の開発が必要である。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究ではシャドウグラフィ像等を用いた新規の光学的手法によって、超音波音場を非接触で正確かつ高速に3次元計測する手法を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究で構築した実験系のうち、光位相コントラスト法を用いた場合の概略図を図1に示す。波長532 nmのパルスレーザーはピンホール通過後に大口径レンズで平行光となり、水槽に入射する。水槽中には超音波トランスデューサとして超音波イメージングプローブが設置されており、下向きに超音波を発生するようになっている。また、イメージングプローブは回転ステージに接続されており、水槽中で回転できるようになっている。この音場を通過した平行光は音圧分布によって位相変調を受ける。この位相変調を受けた光を大口径レンズで集光し、位相板によって空間的に均一な成分(位相変調を受けていない直接光成分)に対してのみ $\pi/2$ の位相差を与える。位相板によって位相差を与えられた直接光成分と、音場によって位相変調を受けた回折光成分を干渉させ、この像をカメラで取得する。この1回の撮像により、音場の2次元情報を得ることができる。続いてイメージングプローブを2度回転させ、同様に画像を取得する。これを180度回転させるまで繰り返し行い、音場の3次元情報を取得する。

次に、得られたそれぞれの画像から光の位相変調の積算値を算出し、そこから音場の積算値に換算する。様々な角度から得られた画像全体の情報を使って、各位置における圧力を求める。

ここまでの手順で瞬時の比較的低強度な超音波音場は取得することができる。本研究では、この測定値を用いた音響ホログラフィによって、様々な音場を再構成することとした。音響ホログラフィは、超音波の伝播計算を用いて異なる時刻の音場を再構成する手法である。原理的には2次元ハイドロフォン測定と音響ホログラフィを組み合わせた手法の測定部分を光学的手法に置き換えたものに相当する。最初に、測定値を初期条件として超音波の逆伝播を計算することで、トランスデューサ面での超音波の空間・時間分布を取得する。続いて、得られた分布を境界条件として順伝播を計算することで、音場全体の空間・時間分布を得ることができる。これによって、焦点では超音波強度が高く直接的な光学計測が困難な場合でも、集束前の音場を取得することにより、全領域での音場を再構成することができる。ただし、3次元の数値計算、特に超音波伝播の非線形を考慮したり、反射などを考慮したりする計算では計算時間が非常に長時間となる場合もあるのが欠点として挙げられる。

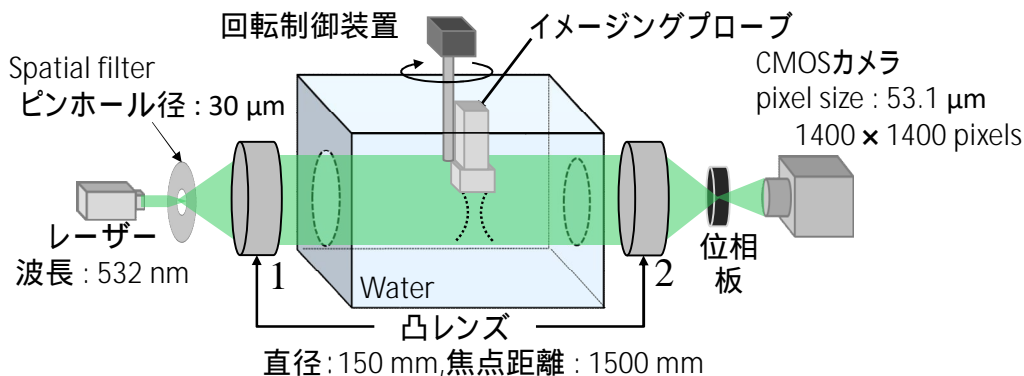


図1 光位相コントラスト法の実験系概略図

### 4. 研究成果

セクタープローブを用い、5.6 Vppの印加電圧で駆動波形を周波数1.88 MHzの矩形波2波とした場合に、光位相コントラスト法による測定を行い、音響ホログラフィによって再構成された圧力分布を図2に示す。図の横軸は時間、縦軸はセクタープローブの素子が並んでいる方向(ラテラル方向)を示している。図2の左側は比較用に測定したハイドロフォンによる測定結果である。ハイドロフォンを1次元走査することで、時間1次元、空間1次元の2次元データを取得した。この結果から、本研究で開発した手法は、ハイドロフォンによる測定結果をよく

再現できていることがわかる。しかも、図2のそれぞれの音場は1セットの光学的測定結果を用いた超音波伝播数値計算であり、測定時間が短時間ですむというメリットがある。

また、このときの焦点音圧の時間履歴を図3に示す。青の実線が光学的測定値を用いた音響ホログラフィによって再構成された結果を示しており、赤の破線がハイドロフォンによる直接測定結果を示している。この結果から、音圧分布だけでなく、音圧の絶対値も本研究によって開発した手法で精度良く再構成できていることがわかる。

なお、同じセクタープローブ、同じ駆動電圧で超音波焦点をラテラル方向に15度振った場合についても同様の光学的測定および音響ホログラフィ再構成を行っている。同様にハイドロフォン測定結果との比較を行い、良い一致を確認した。

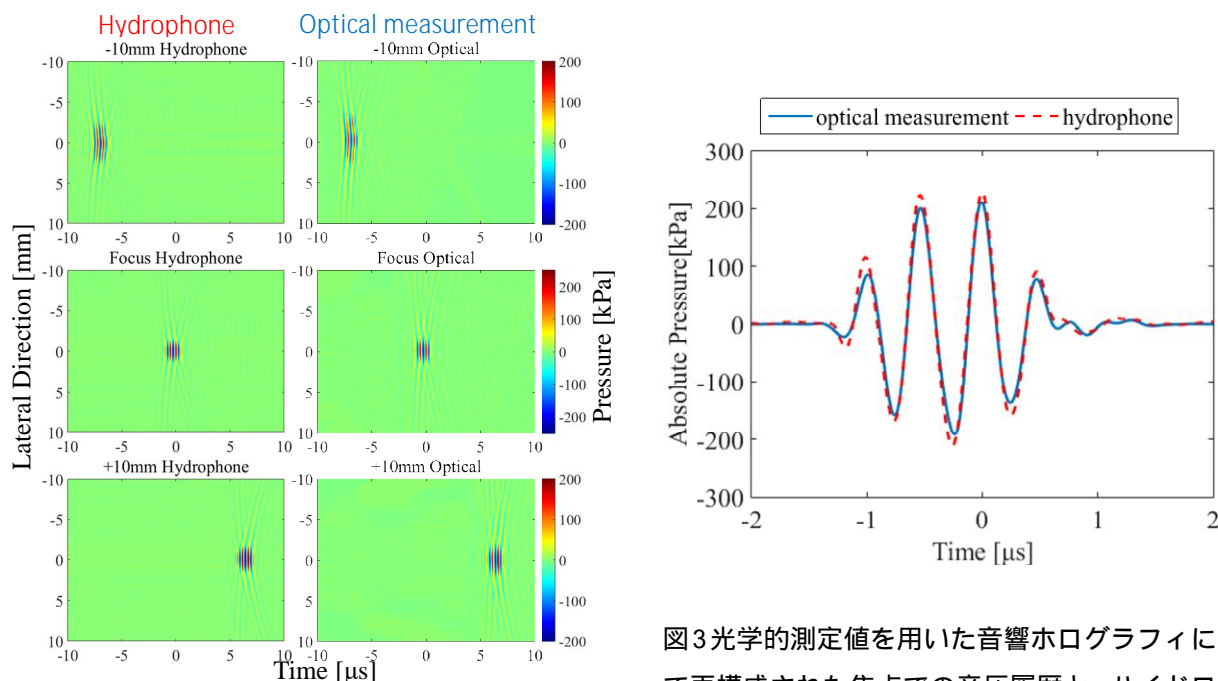


図3 光学的測定値を用いた音響ホログラフィによって再構成された焦点での音圧履歴と、ハイドロフォンによる測定結果

図2 光学的測定値を用いた音響ホログラフィによって再構成されたパルス音場分布とハイドロフォンによる測定結果

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計2件)

T. Nakamura, R. Iwasaki, S. Yoshizawa, and S. Umemura, Quantitative measurement of ultrasonic pressure field using combination of optical phase contrast and nonlinear acoustic holography methods, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 57, 07LB13, 2018.

H. Hanayama, T. Nakamura, R. Takagi, S. Yoshizawa, and S. Umemura, Simulation of optical propagation based on wave optics for phase retrieval in shadowgraph of ultrasonic field, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 56, 07JC13, 2017.

### 〔学会発表〕(計10件)

吉澤 晋, 光位相コントラスト法と音響ホログラフィを用いた診断用超音波音場の測定, 日本超音波医学会第91回学術集会, 2018.

Shin Yoshizawa, Three Dimensional Pressure Field Measurement of Focused Ultrasound by Optical Phase Contrast Method, 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS2017), 2017.

Takuya Nakamura, Quantitative Measurement of High-Intensity Pulsed Ultrasound Pressure Field using Combination of Optical Phase Contrast Method and Acoustic Holography, The 17th International Symposium on Therapeutic Ultrasound (ISTU2017), 2017.

花山 洋貴, 音場のシャドウグラフにおける位相復元を目的とした光伝搬シミュレーション 第37回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム(USE2016) 2016.

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/ume/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：梅村 晋一郎

ローマ字氏名：UMEMURA, shin-ichiro

所属研究機関名：東北大学

部局名：大学院医工学研究科

職名：学術研究員

研究者番号(8桁)：20402787

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。