

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560508

研究課題名(和文) 振動速度情報を用いたイメージングに関する研究

研究課題名(英文) Novel imaging method using ultrasonic vibration velocity on sample in air

研究代表者

今野 和彦 (Imano, Kazuhiko)

秋田大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60125705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：圧電振動子を定電圧駆動し、音響放射面に同位相同振幅の平面振動(USV)が発生することを、圧電振動子の音響放射面に置いた試料表面の振動速度をレーザードップラ振動計によってその分布を測定し振動速度振幅が試料の音響特性インピーダンスに依存することを示した。また、本手法が空気中における固体試料のイメージングに有用であり、Barker系列の音圧パルス信号を用いて高吸収の試料も画像化可能なことも実証した。

研究成果の概要(英文)：A new ultrasonic imaging system using vibration velocity is described. Uniform Surface Vibration (USV) is obtained when the piezoelectric transducer is driven by the constant voltage source. Imaging of sample placed on the piezoelectric transducer detected with the Laser Doppler vibrometer is suggested. Vibration velocity waveform which is analogous to that of driving voltage pulse in time are confirmed both from the analysis of transmission line model and experiments. Experiment of imaging having the character "U.S" on the aluminum plate are imaged. As the results, the suggested system would become a useful tool for an ultrasonic imaging in air. Moreover, this method was applied in the low S/N condition imaging, Barker coded pulse was useful in the high absorption sample imaging.

研究分野：超音波工学

キーワード：圧電振動子 定電圧駆動 振動速度 レーザードップラ振動計 伝送線路モデル 符号化超音波 Barker系列

## 1. 研究開始当初の背景

圧電振動子は電圧信号によって振動子表面に駆動力が発生しこれによって振動子表面が振動するものであり、これを利用して超音波アクチュエータや超音波音源として産業・工業および医学を始めとする幅広い分野で実用されている。申請者らはこれまでに圧電振動子の過渡特性とそれが形成する音場に関する研究を行ってきた[1], [2]. 本研究はこれらの知見を応用したイメージング法に関するものである。図1に示すように圧電振動子をパルス電圧で駆動する場合、駆動電圧の持つ周波数成分と振動子の固有振動数の関係および振動子の電気インピーダンスと駆動電源のインピーダンスの関係により振動子の振動特性は大きく変化する。一

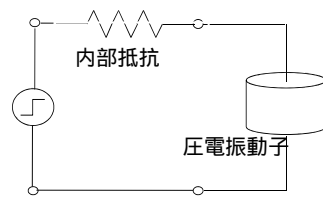


図1 円柱状振動子の駆動

般にパルス電圧やインパルス電圧などの広帯域信号で振動子を駆動して時間分解能向上のため音波を集束させる場合、焦域が小さくなり空間分解能が高くなるために共振周波数の高い圧電振動子を用いることが多い。この場合振動子の厚さは数百  $\mu\text{m}$  程度となり整合層やバッキングなどの加工が容易ではない。また、これらのイメージングは例外なく水中で行われており特に工業分野や電子部品などの検査では実用的ではない。これに対し、筆者らは MHz 帯の空中超音波イメージングを試みているが設定が困難で、空中での音波の高減衰のため S/N が低く映像化が非常に難しい。本研究では数 cm の厚さを持つ圧電振動子を非共振で用い、しかも駆動電源のインピーダンスを極端に小さく、すなわち定電圧駆動時に振動子表面に駆動電圧と時間的に相似な速度波形が得られることを利用する。さらに振動子表面上に置かれた物体の表面振動速度を光学的に検出して画像化

するもので空中でのイメージングが可能である。図2は円柱状の圧電振動子にインパルス状の速度を与えた場合の振動子内の状態を表している。インパルス駆動すると振動面全体が同位相同振幅(USV)で変位し振動子内部にはインパルス状の平面波が伝搬する。同時に振動子の輪郭部分(円周部分)からは edge 波が振動面の中心に向かって伝搬する。時間が経過すると両者は干渉し振動面変位は位相が場所によって異なり平面ではなくなる。すなわち駆動後 edge 波が到達する前であれば振動面は同位相同振幅で振動し単純な連続波、パルス駆動では得られない純粋な平面波振動が得られる。



図2 振動子内部の音場

本研究はこの性質を利用して物体のインパルス音波のイメージングを行っている。この場合物体は水中に置かれるため電子部品などの検査には不向きである。前述のようにインパルス駆動により振動面が同位相で振動することを利用すれば振動面上に置かれた物体の振動面側の面も同位相の振動で駆動されることになる。この振動は物体の中を音波として伝搬し他端面に達するが、このとき物体の内部に欠陥や不均一があるとこの面での振動速度が変化する。これをレーザドップラ装置等の光学的な方法で非接触検出すれば空中で対象となる物体の振動速度の分布をイメージングが可能となる。

## 2. 研究の目的

圧電振動子を定電圧電源で駆動したときに振動子の音響放射面の速度が印加電圧と時間的に相似形になることを利用し振動子表面に置かれた物体表面の振動速度及び振動波面を光学的に検出する“振動速度”及び“音速”による新しいイメージング法の開発を目的としたもので、研究目的として

- 1) 圧電振動子駆動時の電源インピーダンスと振動子表面速度の等価回路解析，
- 2) 伝送線路モデルによる振動子および物体の振動特性解析と実験による観測，および
- 3) 1), 2)の結果から IC 内部や金属およびプラスチック等の欠陥や対象の不均一を表面速度をレーザドップラ装置で走査することにより空気中での新しい非破壊イメージングを実現する．

### 3. 研究の方法

本研究の方法は以下のようになっている．

圧電振動子の振動特性の実験検討で駆動電源と振動子との関係および通常の円盤形振動子での同一位相平面波発生の方法について検討した．

圧電振動子の振動について伝送線路モデルによる理論解析を行うと共に映像化に必要なシステムの構成について検討した．

は2年間の成果をもとにシステムの構築を行い種々の物体の映像化を試みる．特に振幅モード，音速モードの利点を明らかにすると共に空間分解能が何によって決定されるのかについての検討を行った．

### 4. 研究成果

#### 圧電振動子の振動速度測定システム<sup>1),2)</sup>

これらの特性を活用した試料のイメージングシステムを図3に示す．発振器から繰返し

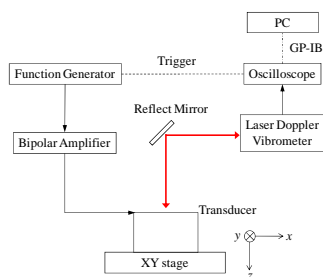


図3 イメージングシステム  
Fig.3 Imaging system.

周波数 100 Hz，パルス幅 1 $\mu$ s の矩形パルスバイポーラ増幅器(電源インピーダンス  $Z_0=1.5 \Omega$ )により 70 V に増幅し，圧電振動子に印加する．駆動によって生じた圧電振動子の電極面(音響放射面)の振動速度波形をレー

ザドップラ振動計により測定し，振動波形をオシロスコープで観測する．この出力波形は GP-IB を介して PC に取り込まれる．実験では直径 60 mm，厚さ 40 mm，制動容量  $C_0=2020$  pF，共振周波数  $f_0=26.5$  kHz の円柱状の PZT 材(Tokin 製，N-21)の圧電振動子を使用した．円柱状の寸法の大きな物を用いる理由は，USV による振動が圧電振動子端部(周辺部)からの輪郭波(edge 波) および振動子の背面からの振動が振動子の中心部分に到達し，これらの影響を受けるまでの時間を確保するためである．

### 測定結果

一般に，圧電振動子をパルス駆動すると最初のパルス波形(USV)に続いて長いリングング波形が生じる．本法では，最初の駆動で得られる USV を用いるもので有り，その後到達する Edge 波や振動子の底面で発生する振動は時間的に遅れてくることを利用する物である．図4は表面の振動速度分布を測定した物で USV が発生していることがわかる．本研究では，これらの影響を受けない時間に存在する USV のみの振動速度振幅値の情報を用いてイメージングを行う．

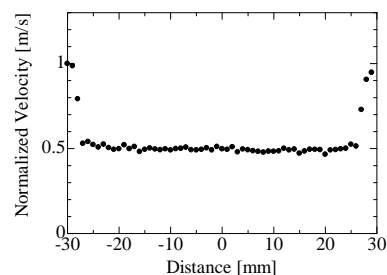


図4 振動速度分布特性  
Fig.4 Vibration velocity distribution characteristic.

本研究では研究方法の にもとづき圧電振動子の伝送線路モデルによる等価回路計算を行い，実験結果と比較した．計算結果と実験において  $\tau/T_p$  を変化させたて USV の振動速度波形を計算し，両者がよく一致することを確かめた．実験の  $\tau/T_p$  変化(すなわち時定数  $\tau(=Z_0C_0)$  )における電源インピーダンス  $Z_0$  の変

化)は、図1のバイポーラ増幅器と圧電振動子の間に抵抗  $R_0$  を直列に接続することで  $Z_0$  の値を変化させている。両者の比較結果より、両者ともに  $\tau/T_p$  が小さいほど駆動電圧波形と時間的に相似な出力振動速度波形が得られることが確認された。また、 $\tau/T_p$  が大きくなれば波形が駆動電圧波形とは異なり、その振幅値も小さくなる。そのため、できる限り時定数を小さくする必要があり、以下では  $\tau/T_p=0.1$  として実験を行う。

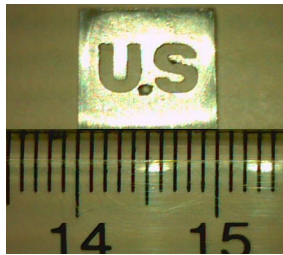


図5 イメージング試料の外形  
Fig.5 Shape of imaging sample.

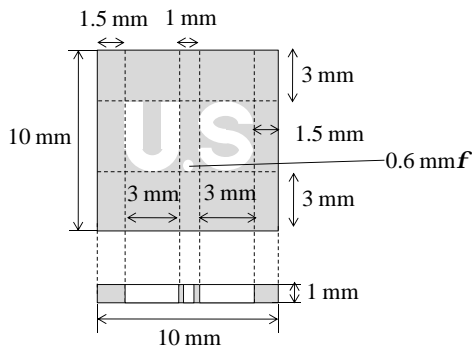


図6 イメージング試料の各寸法  
Fig.6 Each dimension of imaging sample.

図4の結果から明らかなように、圧電振動子の音響放射面では場所によらず振動速度がほぼ一定であることが確認できる。ただし、音響放射面の端に近い部分では edge 波の影響により振動速度が一定ではなくなることが確認できる。したがって、イメージングを行う際には振動速度が一定となる圧電振動子中心部分に試料を配置する。試料部分では圧電振動子の音響放射面との振動速度差が生じ、振動速度の差の情報が得られると考えられる。

図5に、イメージング対象とした試料を示す。また、図6に試料の各寸法を示す。試料の材質はアルミニウムであり、文字部分の太さは1 mm であり空洞（振動子表面）となっている。測定範囲は8 mm の正方形の範囲とし、レーザドップラ振動計のレーザビームの走査間隔は0.2 mm として測定を行った。

### イメージング結果

図7にイメージング結果を示す。図7は振動速度振幅を元にイメージングを行ったもので振動子表面速度を基準にして示している。この場合材料がアルミニウムであるため、表面速度は振動子のそれより大きくなるため明るく表示されている。一方、振動速度の試料表面と振動子表面の時間差にあたる伝搬時間の差)を測定することで、同様にイメージングが可能と考えられる。図8はその結果である。文字部分は空洞であり圧電振動子面そのものであるが、アルミニウムの文字の切削部分が時間の基準(0)で表面は遅れ時間を

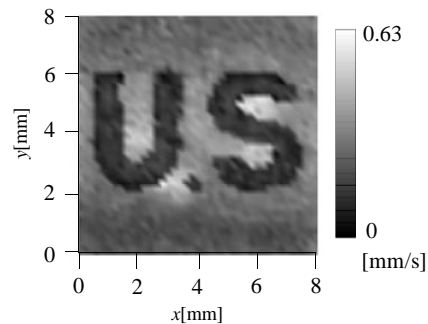


図7 振動速度振幅によるイメージング  
Fig.7 Image of aluminum plate using velocity amplitude

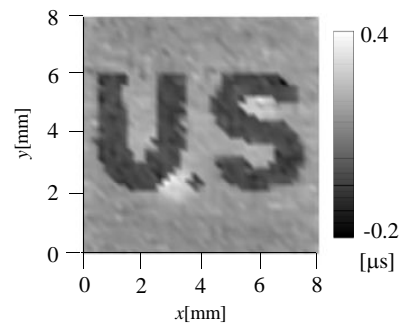


図8 振動速度の時間差によるイメージング  
Fig.8 Image of aluminum plate using time difference of velocity waveform

生じている。図7の振動速度差イメージングの結果から、試料部分で振動速度が大きく文字部分では小さく検出されており、対象物の文字(U.S)をイメージングできている。

なお、図5,6に示されるように、対象となるアルミ板にある0.6 mmφの穴(UとSの間)についても図7,8においてイメージングされており、穴の直径と等しい画像が得られることから本方法によって0.6 mmの空間分解能を得ることを確認できる。これは数百MHz帯の超音波顕微鏡レベルの分解能であり本法の有効性を示すものである。

#### <引用文献>

1. 今野和彦, 佐藤博仁: “振動速度情報を用いた超音波イメージングの一方法”, 素材物性学雑誌, vol. 25, no. 1/2, pp. 14-19, 2013.
2. K. Imano: “Barker-coded Ultrasonic Imaging using Optical Surface Vibration Measurement”, Journal of the Imaging Society of Japan, vol. 53, no. 6, pp. 476-479, 2014.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

1. 今野和彦, 石塚直樹: “超音波計測時の固体接触部からの高調波発生に関する実験的検討”, 素材物性学雑誌, 査読有, vol. 24, no. 1/2, pp. 13-19, 2012.
2. M. Fukuda and K. Imano: “The Detection of Second Harmonic Components of Lamb Waves Generated from Fatigue Plate Using a Double-Layered Piezoelectric Transducer”, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有 vol.51, no.7, pp.07GB06-1-5, 2012.
3. K. Imano and T. Endo: “Experimental Study on the Mode Conversion of Lamb Wave Using a Metal Plate Having a Notch Type Defect”, Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour., 査読有 vol. 19, no. 1/2, pp. 20-23, 2013.
4. 今野和彦, 佐藤博仁: “振動速度情報を用いた超音波イメージングの一方法”, 素材物性学雑誌, 査読有 vol. 25, no. 1/2, pp. 14-19, 2013.
5. 福田誠, 米内巨樹, 今野和彦: “軸力に対する二次高調波超音波の増加分を用いたボルト締結評価に関する一検討”, 電子情報通信学会論文誌A, 査読, vol. J96-A, no. 8, pp. 590-592, 2013.
6. K. Imano: “Optical observation method for ultrasonic field using the shadowgraph introducing pulse inversion averaging”, IEICE Electronics Express, 査読有 vol. 11, no. 17, pp. 1-6, 2014.

7. K. Imano: “Barker-coded Ultrasonic Imaging using Optical Surface Vibration Measurement”, Journal of the Imaging Society of Japan, 査読有 vol. 53, no. 6, pp. 476-479, 2014.

[学会発表](計 27 件)

1. 吉田翔, 今野和彦: “振動速度を用いたイメージングに関する一検討”, 日本音響学会 2012 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1425-1426, 2012.
2. 吉田翔, 今野和彦: “振動速度を用いた薄い試料の厚さ計測に関する一方法”, 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1357-1358, 2012.
3. S. Yoshida and K. Imano: “A consideration of ultrasonic imaging method using vibration velocity in air”, The Society of Instrument and Control Engineerings Annual Conference 2012 (SICE 2012) (Akita, Japan), Paper No. WeA02-03, Proceedings of SICE 2012 (DVD-ROM), pp. 1168-1170, 2012.
4. K. Imano: “Barker-coded Ultrasonic Imaging using Optical Surface Vibration Measurement”, Journal of the Imaging Society of Japan, vol. 53, no. 6, pp. 476-479, 2014.
5. 吉田翔, 今野和彦: “振動速度を用いた超音波計測およびイメージングに関する研究”, 平成 25 年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」講演資料, pp. 11-12, 2013.

[図書](計 1 件)

M. Fukuda and K. Imano: “A novel method for detecting second harmonic ultrasonic components generated from fastened bolts”, NONLINEAR ACOUSTICS State-of-the-Art and Perspectives, American Institute of Physics, pp. 215-218, 2012

[産業財産権]

出願状況(計 2 件)

名称: イメージング方法およびイメージング装置  
発明者: 今野和彦  
権利者: 秋田大学  
種類: 特許  
特願番号: 2010-274143  
出願年月日: 平成 25 年 12 月 6 日(審査請求日)  
国内外の別: 国内

名称: イメージング方法およびイメージング装置  
発明者: 今野和彦  
権利者: 秋田大学  
種類: 特許  
特願番号: 2013-270010  
出願年月日: 平成 25 年 12 月 26 日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.ee.akita-u.ac.jp/~imano-lab>

## **6 . 研究組織**

(1)研究代表者 今野和彦 (Kazuhiko IMano)  
秋田大学大学院工学資源学研究科・教授  
研究者番号：6 0 1 2 5 7 0 5