

研究論文

振動速度情報を用いた超音波イメージングの一方法

今野和彦*, 佐藤博仁*

A New Ultrasonic Imaging Method in Air Using Vibration Velocity at an Object

Kazuhiko Imano[†] and Hirohito Sato[†]

A new ultrasonic imaging method by detecting the surface vibration velocity of a sample placed on the piezoelectric transducer is described. Surface vibration velocity of a sample is optically observed and their simulation is also performed to confirm the necessity of constant voltage drive in generating arbitral velocity waveforms on the surface of piezoelectric transducer. To demonstrate the possibilities of ultrasonic imaging, characters on an object was imaged by measuring the difference in surface vibration velocity between the object and the piezoelectric transducer. An experiment for an aluminum sample shows the effectiveness of our method in non-contact ultrasonic imaging in air. The experimental results suggested that the spatial resolution of the proposed system depend on the spot size of laser light of Doppler vibrometer is also described.

Key Words : ultrasonic imaging, vibration velocity, constant voltage drive, piezoelectric transducer

1. はじめに

一般に超音波を用いたイメージングは、超音波を水中などの音場媒質中に伝搬させ対象物からの反射波を受波する方法で行われることが多い。そのため、例えば水浸法によって超音波イメージングを行うような場合は、対象物の劣化や腐食および短絡の恐れがある電子デバイスなどに用いることができず対象物が制限されてしまう。このような対象物のイメージングでは、空中でイメージングを行うことが望ましいと考えられる。超音波を用いたイメージングの一つに、レーザ走査型超音波顕微鏡 (Scanning Laser Acoustic Microscope : SLAM) がある。しかし、SLAMは数十～百MHz程度の高周波超音波を用いるため、電気系では送受波系がVHF帯において広帯域であることが必要であり、また音波の波長が μm オーダーであるため機械的に高精度が要求される。さらに音波の送受波に用いる送受波トランスジューサに高分子やスパッタリングが必要な薄膜トランスジューサが必要であるなど装置が簡単でなく、対象物を水などの伝搬媒質に浸す必要がある、さらに得られる映像が等間隔の縞状の超音波干渉像であることなどが問題として考えられる[1]。

現在、超音波を用いた医用診断や素材、材料および構造物を対象とした非破壊試験における超音波計測装置の多くは、距離分解能を向上するために、超音波のパルス幅を短くすることが行われている。このパルス幅に関して、圧電振動子の基本共振周期より十分短い時間幅を持ったパルス電圧で圧電振動子を定電圧駆動した場合に、入力電圧パルス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知られており[2]、これを利

用したインパルス超音波音場やイメージングに関する研究も報告されている[3], [4]。これらの報告では、圧電振動子をステップ電圧で駆動した場合、圧電振動子の音響放射面、また、振動子の形状のedgeなどの不連続部分および圧電振動子の背面からも超音波が発生することが述べられている。駆動の際の第1波に限っては同位相同振幅の平面波が発生し、その振動速度は放射面全体で一定となる。さらに平面波の伝搬路中に対象物を配置した場合に、音圧振幅の差によりイメージングが可能であることもすでに報告されている[5]。これらのイメージング法はいずれも変換器に接する水などの音場媒質中に超音波を放射して対象物からの反射波や透過波を対象としてイメージングする水浸法に分類されるもので前述の問題がある。

本論文ではこれらとは異なり、パルス駆動特性を利用した空気中における新たなイメージングについて述べる。一般に、空気中において超音波は周波数に比例して吸収減衰が大きくなるため、高周波化が難しく超音波を送波して対象物からの反射波を受波することを空気中で行なうことは難しい[6]。また、送波および対象物から反射波は回折が生じてしまうため、トランスジューサと対象物の距離が長くなると得られる画像がボケてしまい[7]、方位分解能の低下をまねく。

本論文で述べる方法はイメージングの対象物に水などの音場媒質を通して音波の送受波を行うのではなく、レーザドップラ振動計によって圧電振動子および対象物表面の振動速度を測定することによって空中においてイメージングを試みるものである。すなわち対象物を水などの液状物質に浸す必要がなく、このため媒質中の吸収減衰がなく回折もないという特徴がある。本論文では、はじめに圧電振動子をパルス波で定電圧駆動することによって圧電振動子の音響放射面に発生する同位相同振幅の平面振動 (Uniform Surface Vibration : USV) について述べる。次に、これをもとに音響放射面と対象物表面の振動速度の差を利用した、空気中における振動速度差イメージングについて述べる。

平成24年12月26日受付;平成25年4月17日受理

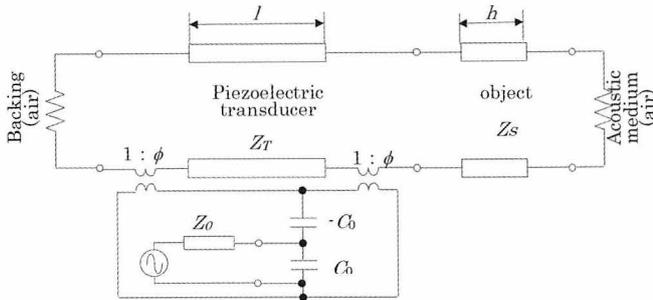
* 秋田大学大学院 工学資源学研究所 電気電子工学専攻
〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

† Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Akita University 1-1 Tagata-gakuenmachi, Akita, 010-8502, Japan
E-mail : imano@gipc.akita-u.ac.jp

2. 伝送線路モデルによる計算

2.1 超音波変換器の伝送線路モデル

圧電振動子とそのインピーダンスよりも十分低い電源インピーダンスを持つ電源で駆動，すなわち定電圧駆動した場合に発生するUSVについて述べる。図1に圧電振動子，対象物（以下では試料とよぶ），音場媒質，バックングおよび電源インピーダンス Z_0 の駆動電源からなる超音波変換器の伝送線路モデルを示す[8]。同図において，バックングおよび音場媒質はいずれも空気であり，抵抗で表わしている。試料および圧電振動子の



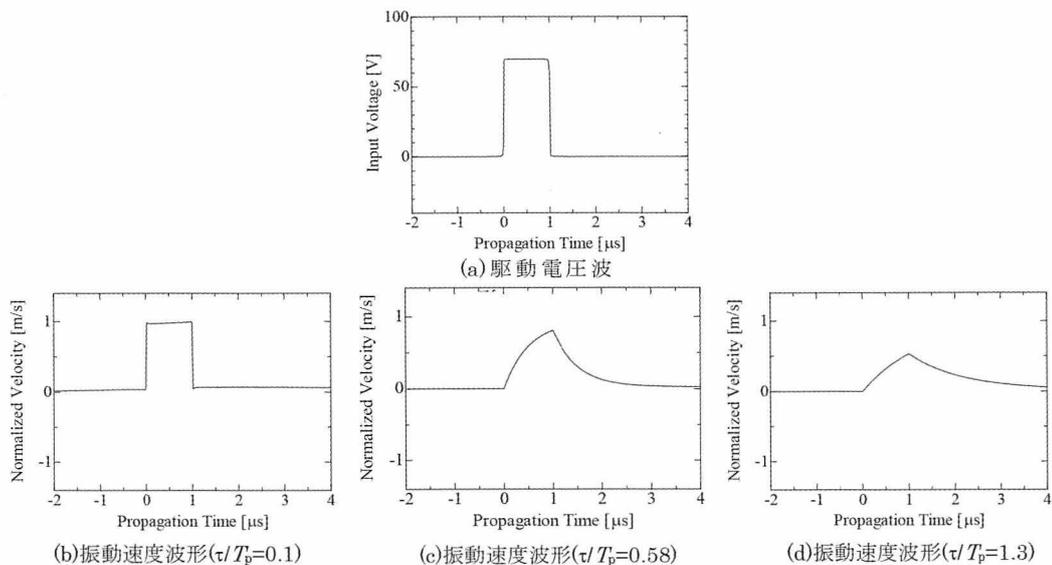
Z_0 : 駆動電源の内部インピーダンス [Ω], C_0 : 圧電振動子の制動容量 [F]
 ϕ : 電気機械振動変換比 [N/V], l : 圧電振動子の厚さ [m], h : 対象物の厚さ [m]

図1 超音波変換器の伝送線路モデル

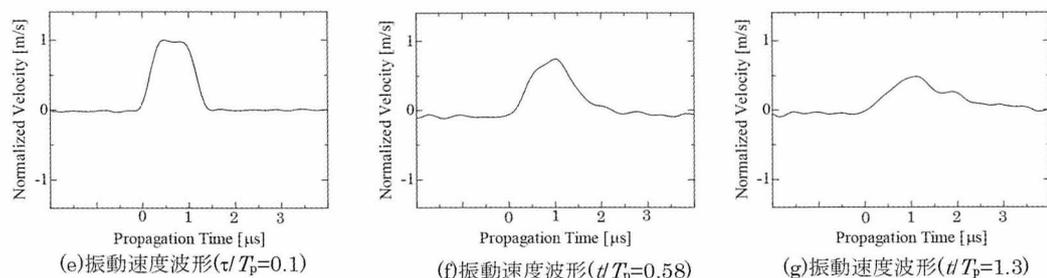
音響特性インピーダンスをそれぞれ Z_S および Z_T とし，これらの厚さを h および長さ l として分布定数線路として計算を行う。また，図中で ϕ [N/V] or [A·s/m] は電気-機械変成比であり， C_0 [F] は圧電振動子の制動容量である。

2.2 解析結果

図2に駆動電圧波形(a)を，また同図(b)~(d)には試料を除いたモデルにより得られた圧電振動子の表面振動速度波形の計算結果を示す。計算は後述の3.2の実験と同条件としてある。各図(b)~(d)においては τ/T_p をパラメータとしている。ここで， τ は電源の内部インピーダンス Z_0 と圧電振動子の制動容量 C_0 の積(Z_0C_0)からなる時定数であり，圧電振動子の制動容量が一定であれば， τ は電源インピーダンス Z_0 の大小を示すパラメータとなる。ここでは駆動電圧波形(後述の実験)の矩形パルス幅 $T_p(=1\mu\text{s})$ で規格化している。すなわち， τ/T_p が小さいことは電源インピーダンス Z_0 が小さいことを表す。図2(b)の振動速度波形より，過去の報告[2]と同様に共振周期より時間幅の短いパルスで定電圧駆動された場合，駆動波形と時間的に相似な振動速度波形が得られることがわかる。すなわち矩形パルス電圧で圧電振動子を駆動すれば図2(b)のように振動速度波形も矩形パルスとなっている。また，図2(b)~(d)から， τ/T_p が小さい，換言すれば駆動電源の内部インピーダンス Z_0 が小さいほど駆動電圧波形と相似に近い振動速度波形が得られる



伝送線路モデル(試料無し)による振動速度 (計算)



τ/T_p 変化による振動速度波形 (実験結果)

図2 駆動電圧波形 (a) および τ/T_p 変化による振動速度波形の数値計算 (b)-(d) および実験結果 (e)-(f)。

ことがわかる。図2(e)-(g)に後述(3.1 図5)のシステムを用いて同条件で行った実験結果を示す。両者の比較からその傾向が一致することがわかる。

図3(a)に $\tau/T_p=0.1$ として3種類の試料を配置した図1のモデルによる振動速度波形の計算結果をまた、同図(b)にこれらの計算結果に対応する実験結果を示す。これらの結果より、材質によって振動速度波形は異なり、振幅も材質により異なることがわかる。

さらに図4(a)に音響特性インピーダンス $Z_s=\rho c[\text{Ns}/\text{m}^3]$ (材質中の音速 $c[\text{m}/\text{s}]$ と密度の積 $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$)に対する規格化された振動速度振幅値特性の計算値を、同図(b)に後述のシステムによる実験結果を示す。すなわち図4では $Z_s=Z_T$ と等しいときの振動速度で規格化しており、 $Z_s=Z_T$ を境にして圧電振動子表面と試料表面の振動速度の大小関係が逆転している。こ

れらの結果から、次章の実験で用いる圧電振動子の音響特性インピーダンス($=34 \times 10^6 [\text{Ns}/\text{m}^3]$)付近を境に、これより音響特性インピーダンスが小さければ振動速度振幅は大きく、大きければ振幅は小さくなり、振動速度振幅が音響特性インピーダンスに反比例することがわかる。

3. 圧電振動子の振動速度測定

3.1 測定システム

前章までに述べた圧電振動子の駆動法と振動速度特性を利用した試料の振動速度測定およびイメージングのシステムを図5に示す。発振器から繰返し周波数100 Hz, パルス幅 $1 \mu\text{s}$ の矩形電圧パルスをバイポーラ増幅器(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。駆動電圧波形を図6(a)に示す。駆動によって生じた圧電振動子の電極面(音

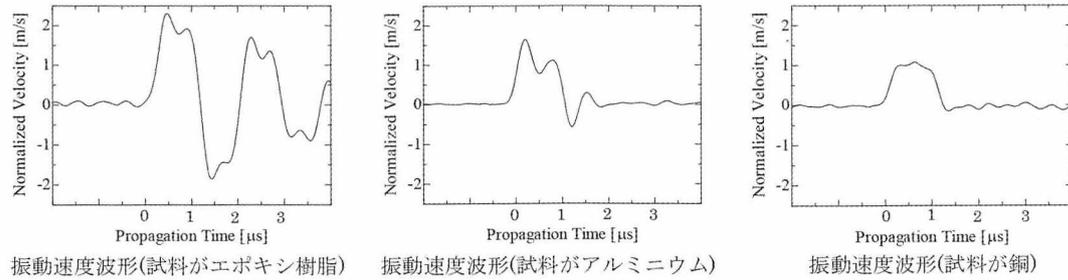
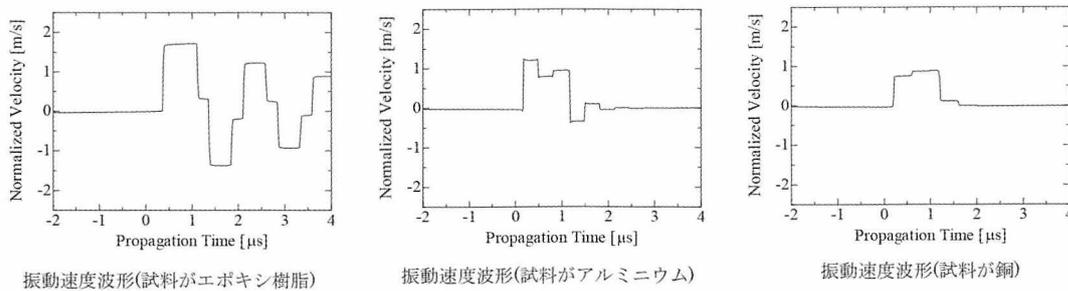


図3 伝送線路モデル(試料配置)による振動速度の計算結果(a)および実験結果(b)。いずれも $\tau/T_p=0.1$

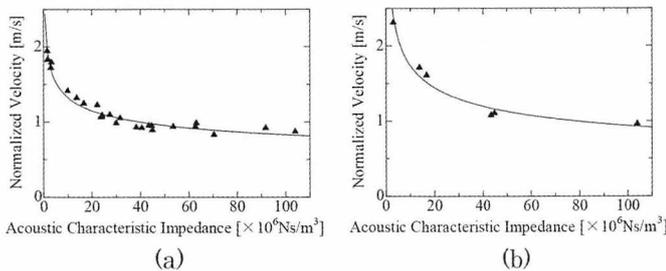


図4 音響特性インピーダンスに対する振動速度特性 (a) 計算結果, (b) 実験結果

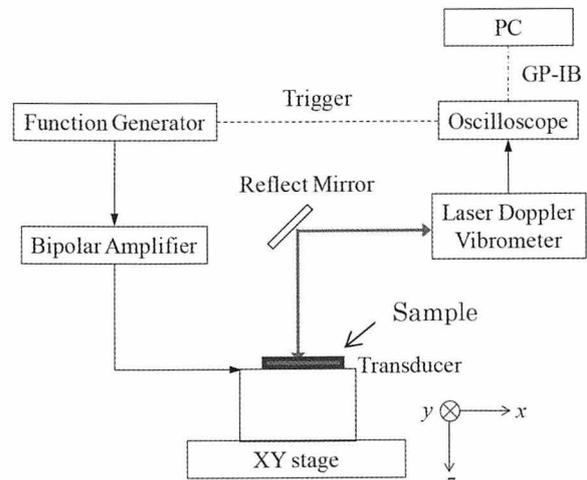
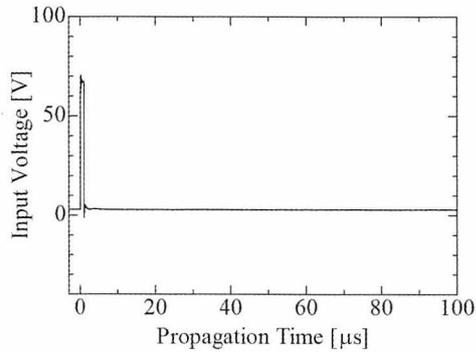
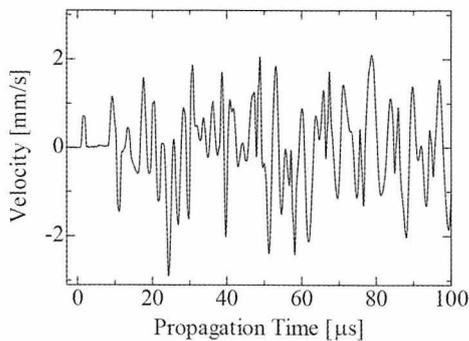


図5 イメージングシステム

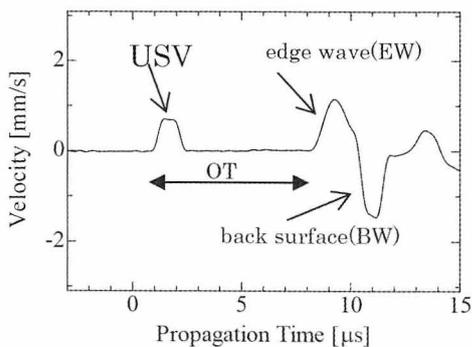
響放射面)の振動速度波形をレーザドップラ振動計により測定し、振動速度波形をオシロスコープで観測する。この出力波形はGP-IBを介してPCに取り込まれる。実験では直径60 mm、



(a)駆動電圧波形



(b)振動子表面の速度波形 (100μs まで)



(c)振動速度波形((b)の 15 μs までの表示)

図6 (a) 駆動電圧波形, (b)(c) 振動速度波形

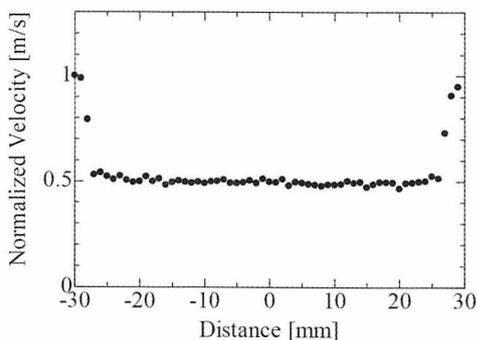


図7 振動速度分布特性

厚さ40 mm、制動容量 $C_0 = 2020$ pF、共振周波数 $f_0 = 26.5$ kHz (共振周期 11.9 μs)、音響特性インピーダンス $Z_T = 34 \times 10^6$ [Ns/m³] 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振動子を用いたのは、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央部分に到達し、これらが干渉して振動速度が一様でなくなるまでの時間、すなわちUSVのみの速度波形を得る時間(図6(b)中のOT)を確保するためである。なお、試料はサリチル酸フェニルを用いて圧電振動子表面に接着している。

3.2 測定結果

図6(a)は圧電振動子の駆動電圧波形を、また振動子表面の振動速度波形を図6(b)に示す。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ていることがわかる。図6(b)の15 μsまでの部分を拡大して示したのが図6(c)である。図6(c)より最初の1発目に駆動電圧の矩形パルス波形と時間的に相似な矩形パルス状の振動速度波形(USV)が発生していることがわかる。また、図6(c)に示すようにその後観測される波形は、圧電振動子の端部すなわちedge(中心から30 mm)からのedge波(EW)および振動子の背面(厚さ40 mm)から発生する振動速度波形(BW)である。これらは音響放射面の振動とedge波の場合は同極性、背面からの波は逆極性の振動波形である。本論文では、このためEWおよびBWの影響を受けない時間(図6(b)中のOT)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。なお、実験の τ/T_p 変化(すなわち時定数 $\tau (=Z_0 C_0)$ における電源インピーダンス Z_0 の変化)は、図5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。前述のように図2(e)-(g)から、計算結果と同様に実験においても τ/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できる。 τ/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7に、圧電振動子の音響放射面の中心を含む端から端までの振動速度分布特性を示す。この結果から、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。

4. 振動速度差を利用したイメージング

4.1 イメージングの対象物

図8に、イメージング対象とした試料(a)とその寸法(b)を示す。試料の材質はアルミニウム ($Z_0 = 11.4 \times 10^6$ Ns/m³)であり、文字部分の太さは1 mmであり空洞となっている。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はx-yステージを用いて、左右上下方向でそれぞれ0.2 mm間隔で走査し、各位置においてレーザドップラ振

動計から得られる振動振幅値を記録しながら試料全体にわたって全体で1600点のデータを取得した。データ取得には約30分程度必要である。得られたデータは試料がないときの振動速度データを予め測定しておき、試料があるときの値との差を取りこの値をグレイスケールで表示している。試料の大きさは前述のEWとBWの影響、特にEWの影響を受けないようにするため中心から20 mm程度が適当である。

また、固体の音響特性インピーダンスの値はほとんどが $1 \times 10^6 \text{Ns/m}^3$ から $100 \times 10^6 \text{Ns/m}^3$ の間にある[9]ことから、本イメージング法で得られる振幅は最大でも40dB程度のダイナミックレンジを有する可能性があり、送受系の電子回路はこれよりもダイナミックレンジが大きくなければならない。本システムではレーザドップラ振動計が最もダイナミックレンジが小さく約60 dBであるがイメージングには十分である。

4.2 イメージング結果

図8(c), (d) にイメージング結果を示す。図8(c)の振動速度差イメージングの結果から、試料部分では振動速度が大きく検出され、一方、文字部分では振動速度が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。また図8(d)は振動速度が観測される時刻の時間差、すなわち振動が試料内を伝搬する時間の時間差によるイメージングであり、このような方法によってもイメージングが可能であることがわかる。また、0.6 mmφの穴をイメージングできていることから本手法の空間分解能は0.6 mmより高いことがわかる。

4.3 2つの材質からなる試料のイメージング

図9(a), (b) にそれぞれエポキシ樹脂およびアルミニウムか

らなる試料およびその寸法を示す。図10(a), (b)にはそれぞれの試料表面での振動速度波形を示す。試料によって振幅が異なり、波形も異なることがわかる。図11(a), (b)に前節と同じシステムで、走査間隔を0.1 mmとし、4 mmの正方形内を測

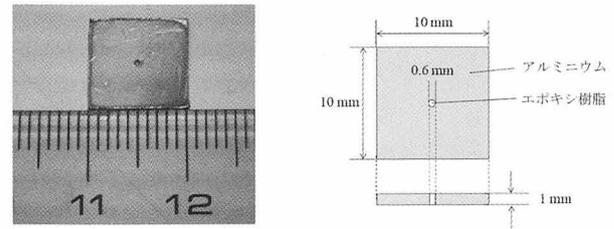
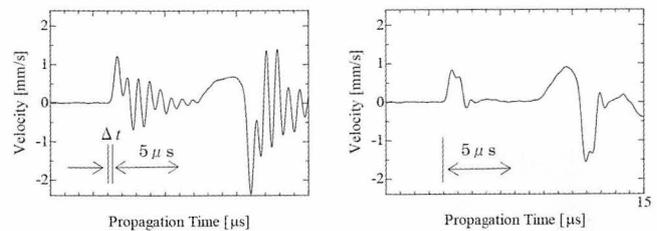


図9 アルミニウムとエポキシ樹脂(穴部分)からなる試料

(b) 試料の寸法

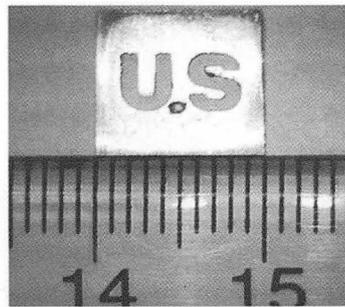
図9 エポキシ樹脂およびアルミニウムからなる試料の外形(a) エポキシ樹脂およびアルミニウムからなる試料の寸法(b)



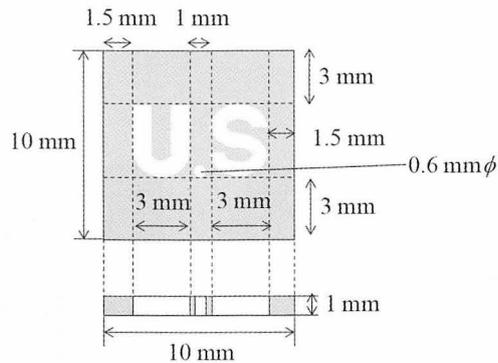
(a) 振動速度波形(エポキシ樹脂部分)

(b) 振動速度波形(アルミニウム部分)

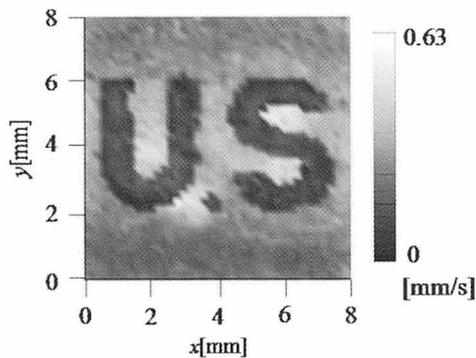
図10 エポキシ樹脂およびアルミニウムからなる試料の振動速度波形。(Δt: 到達時間差, エポキシ部分の方が音速が遅いためΔtだけ遅れる)



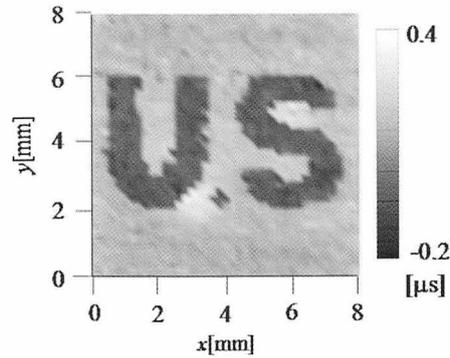
(a) イメージング試料



(b) 試



(c) 振動速度差によるイメージング



(d) 伝搬時間差によるイメージング

図8 イメージング試料(a), 試料形状寸法(b)および振動振幅イメージング(c), 時間差イメージング(d)

定したそれぞれの試料のイメージング結果を示す。図11(a)より、エポキシ樹脂部分では振動速度が大きく、アルミニウム部分では振動速度が小さく検出され、振動速度差により材質の違いをイメージングできていることがわかる。また、図8(a)と同様に振動波形の伝搬時間の差を用いたイメージング結果である図11(b)においても同様に材質の違いをイメージングでき、試料の厚さが同じ場合には振動速度波形の観測時刻の差は試料の中の音速の差をイメージングできると考えられる。

以上の結果より、振動速度の差を用いた本手法は試料の音響特性インピーダンスや音速といった音響特性をイメージングでき、空気中でのイメージングの一方となり得ることを示した。本手法の空間分解能は、試料中での超音波の送波と受波を行わないため回折がほとんどなく、一般的な超音波イメージングで重要となる音波の波長に依存する空間分解能では定義することはできない。そのため、本手法の空間分解能が何に依存するか検討が必要である。

4.4 空間分解能の検討

図12に示す0.6 mmより小さいピンホールの穴を試料に測定

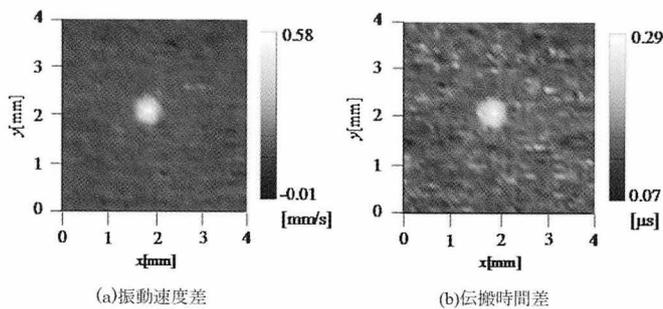


図11 エポキシ樹脂およびアルミニウムからなる試料のイメージング結果

する。ピンホールの材質はアルミニウムであり、寸法は直径5 mm、厚さ0.5 mmである。また、ピンホール中心にはそれぞれ図12(a), (b) および (c) のように直径200, 100および60 μm の穴があり、これを対象としている。図13に試料面を20 μm 間隔で測定した振動速度分布を示す。この結果より、振動速度がアルミニウムより小さい圧電振動子の音響放射面である各寸法の穴を確認することができ、この結果から本手法の空間分解能は60 μm より高いことが考えられる。本研究で用いたドップラ振動計で用いているレーザー光のスポット径は20 μm であるため、本手法の空間分解能は20 μm 程度であると考えられ、使用するレーザー光のスポット径に依存する可能性が類推される。また、これらの結果から各寸法通りのピンホールの穴を確認することができるため、本手法では試料内での音波の回折による影響は小さいと考えられる。

本方法では矩形パルスで駆動し、これと相似な矩形の振動速度が得られるが、いわゆる波長は定義できないため空間分解能については新たな考察が必要となる。本実験ではパルス幅の逆数 ($1/1 \times 10^{-6} = 1 \times 10^6$) は1 MHzであり、この周波数付近までに多くのエネルギーが含まれていると考えられる。仮に周波数を1 MHzとしたときの振動子表面での音波の波長は音速が4300 m/sであることから4.3 mmとなり、上記の空間分解能の値とは大きく異なる。すなわち、本手法の空間分解能の定義は従来の音波を送受波するイメージングとは異なることから上記のような実験などによって明らかにする必要がある。今後異なるレーザー光の装置を用いるなどによって空間分解能との関係から明らかにする必要がある。

5. むすび

本研究では、圧電振動子をパルス波を用いて定電圧駆動して発生する同位相同振幅の平面振動 (USV) を利用し、圧電振動子の音響放射面と試料表面の振動速度差を用いたイメージ

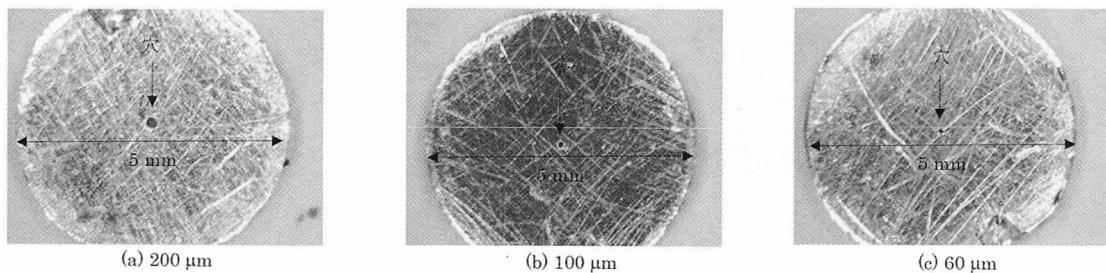


図12 ピンホールの外形

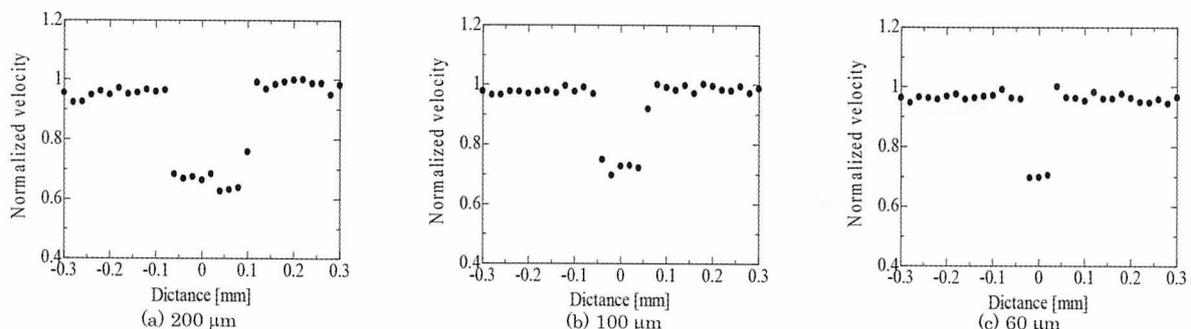


図13 各ピンホールの穴を対象とした振動速度分布

グに関して検討を行った。その結果、振動速度差の検出により試料のイメージングが可能であることが明らかになった。また同時に、試料内での音速差に起因する伝搬時間の差を検出することでイメージングが可能であることも示した。そのため、本手法は空気中におけるイメージングの一方法になり得ることを述べた。本法では音波が試料の厚さ方向に伝搬するが、試料が厚くなると試料内部での音波の回折が起これば本方法の特徴が失われることになるため、今後試料の厚さと測定精度、イメージングの際の空間分解能との関係を明らかにしていく予定である。

謝辞

本研究の一部は科研費（基盤研究（C）課題番号：24560508）の援助を受けた。

参考文献

- [1] 大石 学, 野口健一, 村山和永: “レーザ走査型超音波顕微鏡によるセラミックスの弾性定数の測定”, 日本機械学会論文集, 54巻508号, pp.2087-2092 (1987)
- [2] 佐藤雅弘, 吉田泰夫: “基本共振周期よりかなり短いパルス電圧で駆動された圧電振動子の過渡応答”, 日本音響学会誌, 53巻11号, pp.857-863 (1997)
- [3] K.Imano, Y.Yosida and D.Okuyama, "A method of observing the sound field in transient radiation from a piston source", *J. Acoust. Soc. Jpn*, Vol.(E)12, No.5, pp.233-235 (1991)
- [4] K.Imano, Y.Yosida and D.Okuyama, "Observation of the sound field in transient radiation from a concave piston source using time-transition pattern", *J. Acoust. Soc. Jpn*, Vol.(E)12, No.5, pp.237-239 (1991)
- [5] K.Imano and D.Okuyama, "An acoustic imaging system using impulse ultrasound", *J. Acoust. Soc. Jpn*, Vol.(E)15, No.2, pp.107-111 (1994)
- [6] 谷腰欣司, “超音波とその使い方－超音波センサ・超音波モーター”, pp.75-77, 日刊工業新聞社, 東京 (1994)
- [7] 中島真人, 渡辺 決, “臨床超音波シリーズ 9 新しい超音波診断技術”, pp.17-19, 南江堂 (1984)
- [8] M.Nishihira and K.Imano, "Simulation study of acoustic intermediate layer and electrical source impedance in an ultrasonic pulse system", *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol.25, No.3, pp.203-206 (2004)
- [9] 超音波便覧編集委員会編, “超音波便覧”, pp.724-733, 丸善 (1999)