

物体の表面振動速度計測による
空気中における非接触イメージングの一方法
**A new noncontact imaging method in air
using ultrasonic vibration velocity at an object**

○佐藤 博仁*, 今野 和彦*
○Hirohito Sato*, Kazuhiko Imano*

*秋田大学 大学院工学資源学研究科
*Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

キーワード：圧電振動子(piezoelectric transducer), 定電圧駆動(constant voltage drive),
振動速度(vibration velocity), 伝送線路モデル(transmission line model),
レーザドップラ振動計(Laser Doppler vibrometer), イメージング(imaging)

連絡先：〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1
秋田大学 大学院工学資源学研究科 電気電子工学専攻
今野和彦, Tel : (018)889-2490, Fax : (018)837-0406, E-mail : imano@ipc.akita-u.ac.jp

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. このような対象物をイメージングするには, 空中でかつ非接触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方法の一つに, 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 程度の高周波を用いるため装置が簡単でない, 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に縞の現れる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, 超音波を用いた診断や探傷などの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必要がある. 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, 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^{2,3,4)}. 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, 放射面のedge部分および背面から超音波が発生するこ

とが述べられている. このとき音響放射面から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ものである.

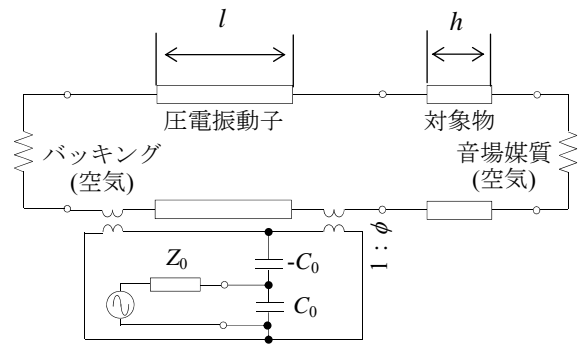
本研究で述べる方法はこれらとは異なり, パルス駆動特性を利用した空気中における非接触イメージング法を新たに提案する. 一般に, 空気中において超音波は減衰が大きくなるため, 超音波を送波して対象物からの反射波を受波することは難しい. 本研究では超音波の送波と受波を行うのではなく, レーザドップラ振動計によって圧電振動子および対象物の振動速度を測定することで空中において非接触でのイメージングを可能にする.

本論では, 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の方法について提案する.

2. 伝送線路モデルによる解析

2.1 超音波変換器の伝送線路モデル

圧電振動子を定電圧駆動した場合に発生する USV について述べる. Fig.1 に圧電振動子, 対象物, 音場媒質, バッキングおよび内部インピーダンス 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⁶⁾. 同図において,



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]

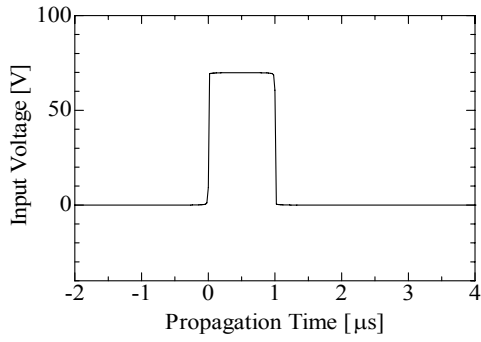
h : 対象物の厚さ [m]

Fig.1 超音波送波系の伝送線路モデル

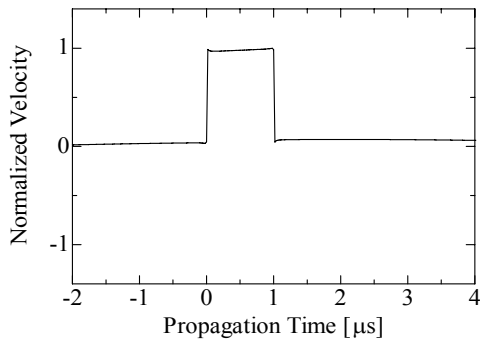
バッキングおよび音場媒質はいずれも空気である. 対象物および振動子を分布定数線路と考えており厚さをそれぞれ l および h としている. ϕ は電気機械変換比であり, C_0 は圧電振動子の制動容量である.

2.2 解析結果

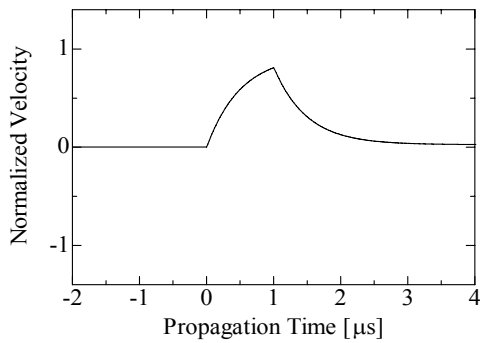
Fig.2 に解析による駆動波形および対象物を除いたモデルにより得られた出力波形を示す. 各図においては τ/T_p をパラメータとしている. ここで, τ は電源の内部インピーダンスと圧電振動子の制動容量の積 ($Z_0 C_0$) からなる時定数であり, 圧電振動子の制動容量が一定であれば電源インピーダンスの大小を示すパラメータとなる. ここでは駆動波形のパルス幅 $T_p (= 1\mu\text{s})$ で規格化している. すなわち, τ/T_p が小さいことは電源インピーダンスが小さいことを表す. Fig.2(b) の出力波形より, 過去に報告された研究²⁾と同様に共振周期より短い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確認できる. また,



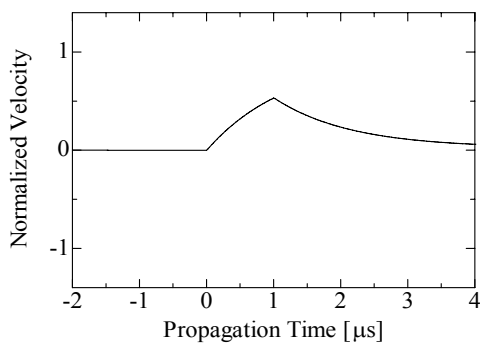
(a) 駆動波形



(b) 出力波形($\tau/T_p=0.1$)

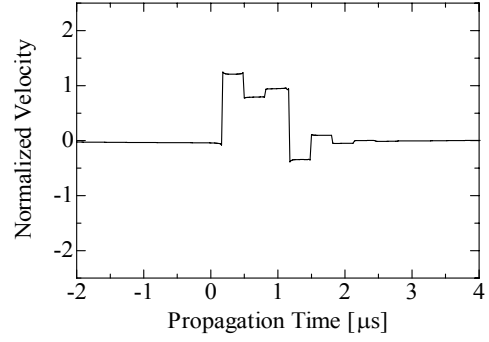


(c) 出力波形($\tau/T_p=0.58$)

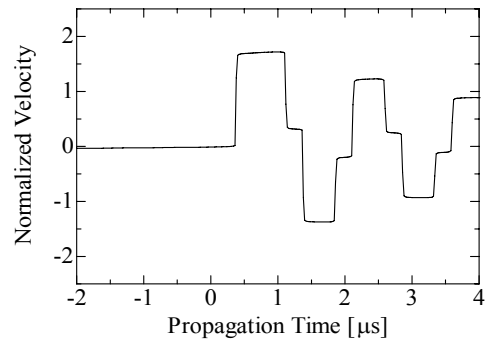


(d) 出力波形($\tau/T_p=1.3$)

Fig.2 伝送線路モデル(対象物無し)による解析結果



(a) 出力波形(対象物がアルミニウムの場合)



(b) 出力波形(対象物がエポキシ樹脂の場合)

Fig.3 伝送線路モデル(対象物配置)による解析結果

Fig.2(b), (c)および(d)より, τ/T_p が小さい(すなわち電源インピーダンスが小さい)ほど駆動波形と相似に近い波形が得られることが確認できる.

Fig.3 に $\tau/T_p=0.1$ として各材質の対象物を配置した Fig.1 のモデルによる解析結果を示す. 結果より, 材質によって振動速度波形は異なり, その振幅は圧電振動子の音響放射面における振幅よりも大きくなることが確認できる.

3. 圧電振動子の振動速度測定

3.1 測定システム

本研究で提案する測定システムを Fig.4 に示す. 発振器から繰返し周波数 100 Hz, パルス幅 1 μ s の矩形パルスバイポーラ増幅器により 70 V に増幅し, 圧電振動子に印加する駆動

波形を Fig.5(a)に示す. 駆動によって生じた圧電振動子の電極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 の円柱状の PZT 材(Tokin, N-21)の圧電振動子を使用する. 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, 影響を受けるまでの時間を確保するためである.

3.2 測定結果

振動速度波形をFig.5(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. Fig.5(b)の15 μs までの部分を拡大して示したのがFig.5(c)である. Fig.5(c)より最初の1発目に駆動電圧波形と時間的に相似な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, その後に観測される波形は圧電振動子の音速(4300 m/s)から, 圧電振動子の端部すなわちedge(中心から30 mm)および振動子の背面(厚さ40 mm) から発生する振動である. 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.

Fig.6 には Fig. 1 の伝送線路モデルによる等価回路解析の結果と比較のため, 実験により τ/T_p を変化させた場合の USV の受波波形を示す. 解析結果と同様に, 実験においても τ/T_p が小さいほど駆動波形と時間的に相似な出力振動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の形状のみならず, その振幅値

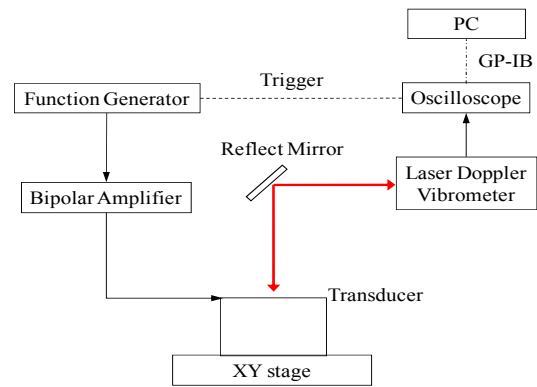
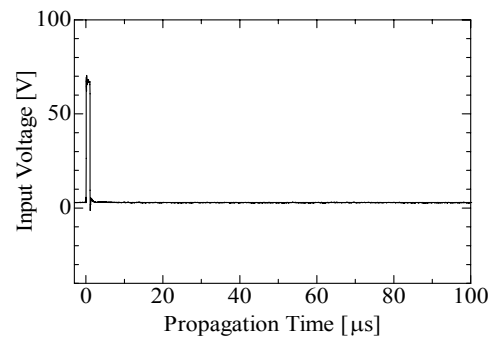
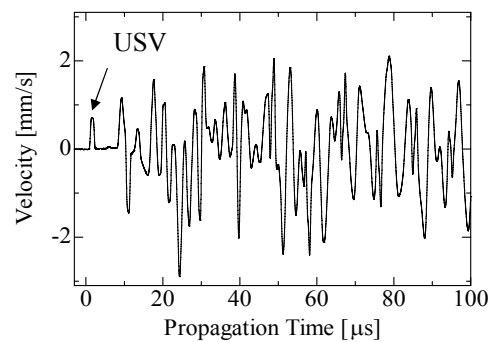


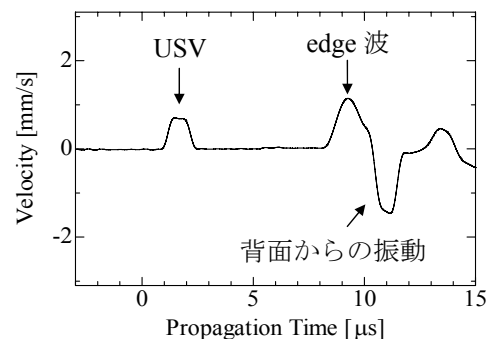
Fig.4 測定システム



(a) 駆動波形

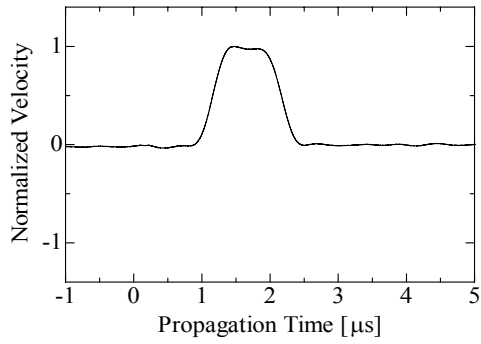


(b) 受波波形(100 μs まで)

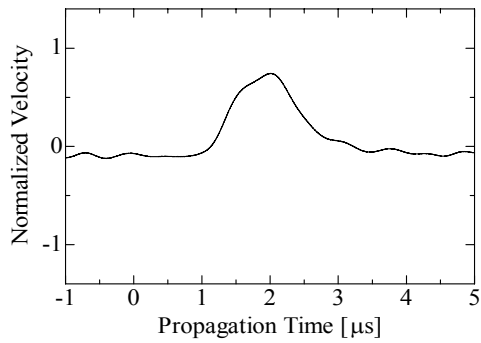


(c) 受波波形((b)の15 μs までの表示)

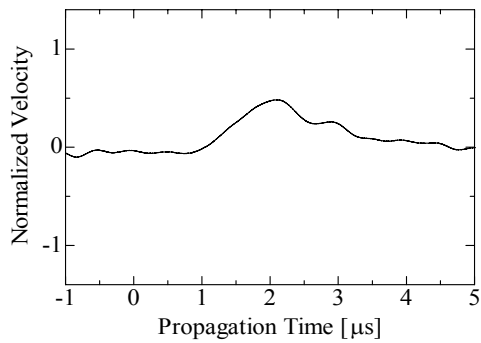
Fig.5 (a)駆動パルス波形
(b), (c)振動速度波形



(a) 受波波形($\tau/T_p=0.1$)



(b) 受波波形($\tau/T_p=0.58$)



(c) 受波波形($\tau/T_p=1.3$)

Fig.6 τ/T_p 変化による受波波形(実験結果)

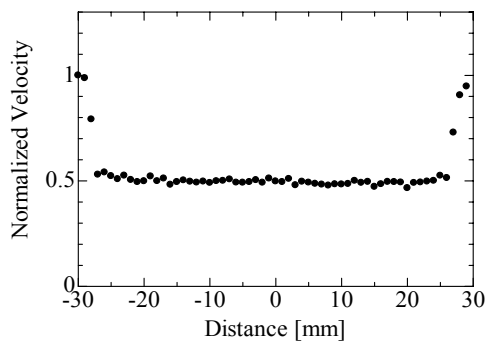
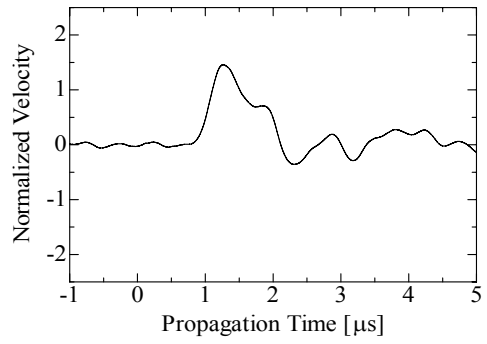
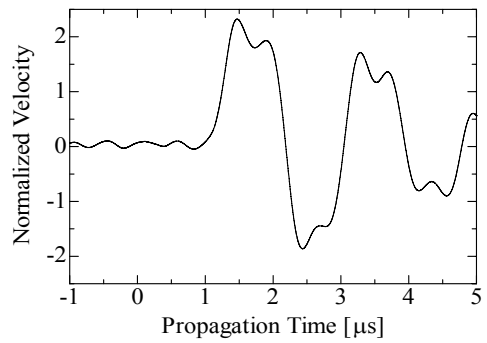


Fig.7 振動速度分布特性



(a) 受波波形(対象物がアルミニウムの場合)



(b) 受波波形(対象物がエポキシ樹脂の場合)

Fig.8 対象物表面における受波波形(実験結果)

にまで影響が出てしまう．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 $\tau/T_p=0.1$ として測定を行うことにした．

Fig.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．この結果より，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，振動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を確認できる．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対象物を配置する．対象物部分では振動面と振動速度差が生じ，振動速度の差の情報が得られると考えられる．

Fig.8 に，圧電振動子中心に配置した 10×10 mm, 厚さ 1 mm の対象物表面における USV の受波波形を示す．結果より，解析結果と同様の

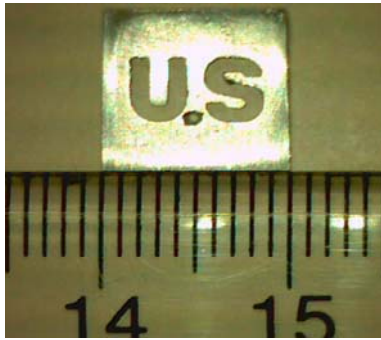


Fig.9 対象物の外形

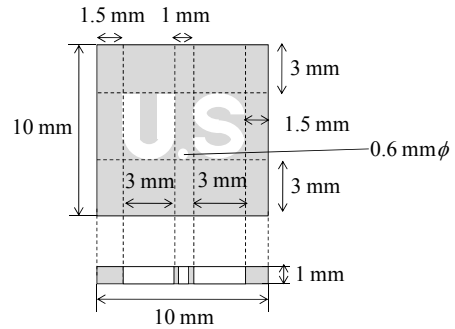
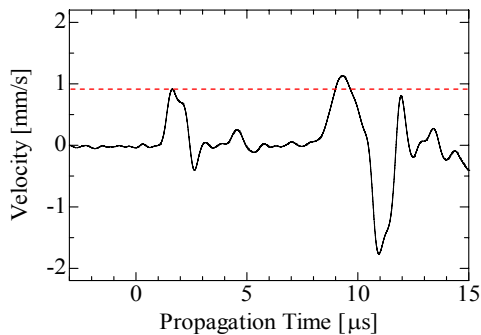
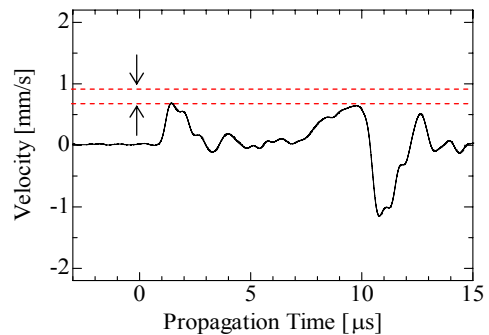


Fig.10 対象物の各寸法



(a) 受波波形(アルミニウム部分)



(b) 受波波形(文字部分)

Fig.11 イメージングの対象物
における受波波形

波形が確認でき、対象物の材質によって振幅が異なるため振動速度差によるイメージングが可能であると考えられる。

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

Fig.9 に、イメージングの対象物を示す。また、Fig.10 に対象物の各寸法を示す。対象物の材質はアルミニウムであり、文字部分の太さは 1 mm であり空洞となっている。測定範囲は 8 mm の正方形の範囲とし、ドップラ振動計のレーザービームの走査間隔は 0.2 mm として測定を行う。

4.2 イメージング結果

Fig.11 に振動速度波形の例を示す。駆動電圧波形は Fig.5(a) と同じく 1 μs 幅の矩形パルスである。レーザードップラ振動計による振動速度波形から、対象物であるアルミニウム部分では振

動速度の振幅が大きくなることが確認できる。そのため、圧電振動子の音響放射面の振動速度を基準とし振動速度差を対象物の各部分について表示することによってイメージングが行えると考えられる。さらに、対象物の厚さ分波形が遅れて発生することから、圧電振動子の音響放射面を基準に伝搬時間の差(最初の振動波形の振幅のピーク値の 1/2 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行なえると考えられる。また、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の角の影響のため、Fig.5(c) と波形が異なると考えられる。

Fig.12 にイメージング結果を示す。Fig.12(a) より、対象物部分では振動速度が大きく検出され、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ことが確認できる。同様に、Fig.12(b)

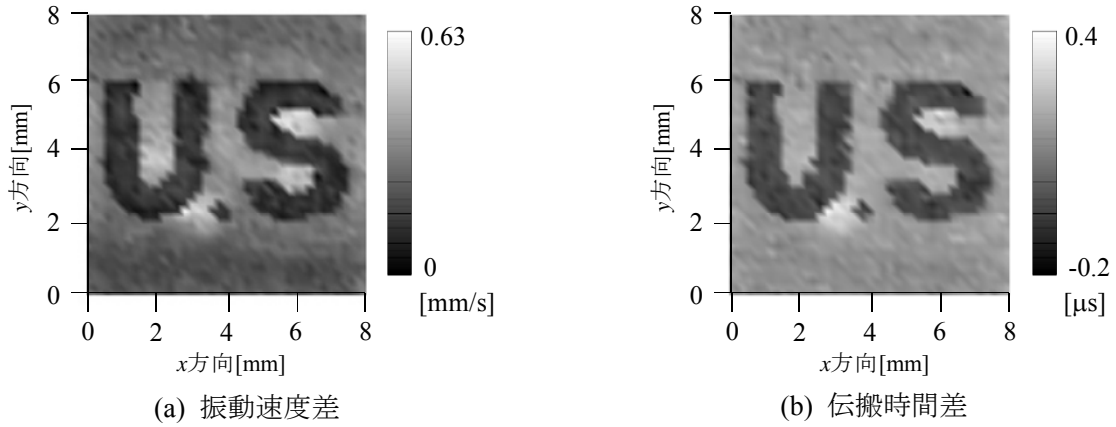


Fig.12 イメージング測定結果

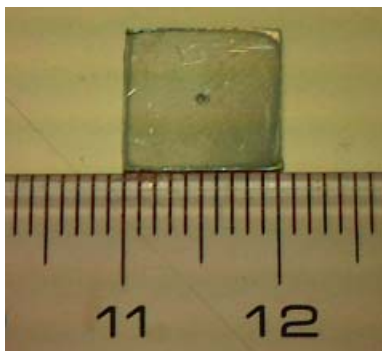


Fig.13 エポキシ樹脂およびアルミニウムからなる対象物の外形

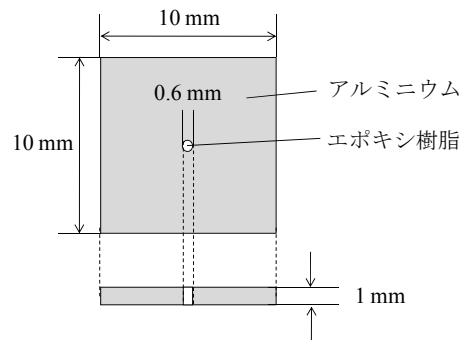
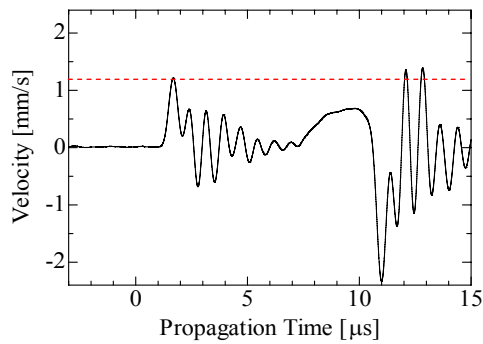
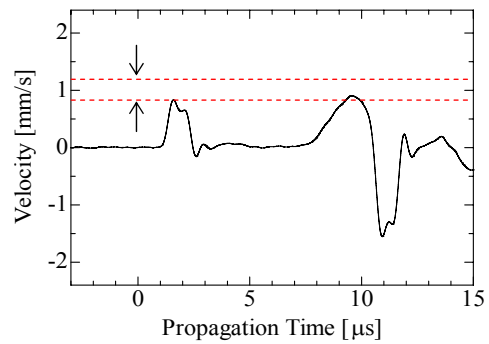


Fig.14 エポキシ樹脂およびアルミニウムからなる対象物の寸法



(a) 受波波形(エポキシ樹脂部分)



(b) 受波波形(アルミニウム部分)

Fig.15 エポキシ樹脂とアルミニウムからなる対象物の受波波形

でもイメージングできていることが確認できる。また、 $0.6\text{ mm}\phi$ 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 より高いことが分かる。

4.3.2 つの材質からなる対象物のイメージング

Fig.13, 14 にエポキシ樹脂およびアルミニウ

ムからなる対象物を示す。Fig.15 に振動速度波形の例、Fig.16 に 0.1 mm 間隔で 4 mm の正方形内を測定したイメージング結果を示す。

Fig.16(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

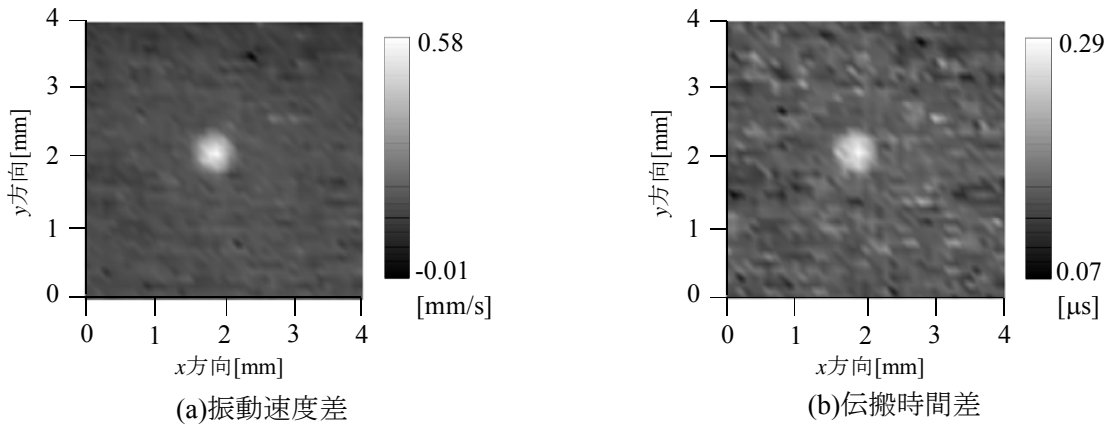


Fig.16 エポキシ樹脂およびアルミニウムからなる対象物のイメージング結果

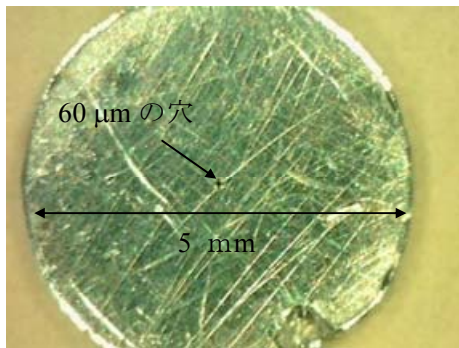


Fig.17 60 μm の穴を持つピンホールの外形

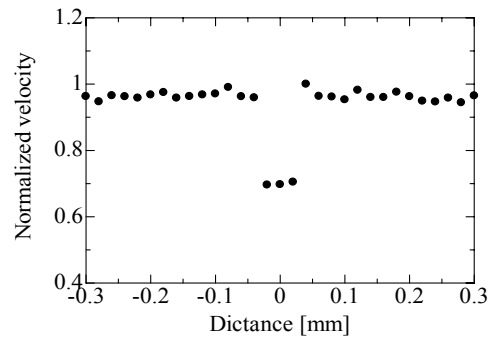


Fig.18 60 μm の穴を対象とした振動速度分布

イメージングできていることが確認できる。また、Fig.15(a)における最初の振動波形の振幅のピーク値の1/2にあたる伝搬時間の差を用いたFig.16(b)においても同様に材質の違いを確認でき、同じ厚さの場合には各材質を伝わる音速の差としてイメージングを表すことが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が空気中における非接触イメージング法として有用である可能性が示せた。この方法の空間分解能は、1 μs の駆動パルスで周波数成分を1 MHz と考えると周波数と圧電振動子の縦波音速から波長 λ は4.3 mm となり、波長に比べかなり小さいものがイメージングできていることがわかる。このため、本手法における空間

分解能は音波の波長によって決まらないことが考えられる。

4.4 空間分解能の検討

Fig.17 に示す 0.6 mm より小さいピンホールの穴を対象に測定する。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直径 60 μm の穴があり、これを対象としている。Fig.18 に 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 60 μm の穴を確認することができる。そのため、本手法の空間分解能は 60 μm より高いことが考えられる。また、本研究で用いたレーザー光の径は 20 μm であるため、本手法の空間分解能は 20

μm 近くまで高くなることが考えられ使用するレーザー光に依存する可能性が考えられる。

5. まとめ

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対象物表面の振動速度差を用いたイメージン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対象物のイメージングが可能であることが明らかになった。本手法は空気中における非接触イメージングの新しい方法として有用と考えられる。

今後は、非破壊試験への応用を検討し、本手法の空間分解能が使用するレーザー光の径に依存するか検討していく予定である。

参考文献

- 1)大石学, 野口健一, 村山和永:“レーザー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, 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)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.