

振動速度情報を用いた薄い板状試料の超音波イメージング

今野 和彦*

(2018.5.24 受理)

Ultrasonic Imaging for Thin Plate Sample Using Vibration Velocity Information

Kazuhiko IMANO*

Constant voltage excitation and its selection of voltage waveform and optical method are introduced into the imaging system for evaluating the thin sample such as electronic device. Information of surface vibration velocity on the piezoelectric transducer and sample are effectively used. Rectangular pulse having the time width of resonance period of transducer was adopted to cancel the mechanical ringing. Exciting efficiency of transducer was improved by larger than 20 dB compared to our previous study. Imaging for the thin brass plate with etched "3" character is clearly imaged using time difference mode. As the result of experiment, possibilities as a tool for evaluating the thin plate like solid sample around several tens of μm such as electronic devices are revealed.

Keywords: Vibration velocity, Ultrasonic wave, Piezoelectric transducer, Velocity difference, Time difference, Thin sample

本論文では、超音波振動の観測から薄い金属やプラスチック等の薄い試料の形状や欠陥を評価する方法として、圧電振動子を定電圧駆動する方法および光学的に非接触で振動速度を測定する手法を用いて振動速度情報の検出からイメージングを行う方法について述べている。最初に圧電振動子の等価回路解析から圧電振動子を定電圧かつ共振周期を持つ矩形波電圧で駆動する方法について述べた。この方法は、圧電振動子の機械的な残留振動（リングング）を押さえることができ、しかも既報³⁾に比べ駆動効率が20 dB以上向上した。この駆動法を用いて圧電振動子を駆動し、振動子面上に置いたエッチングされた金属薄板のイメージングを行った。イメージングは振動速度の時間差を用いた方法について行った。この結果、数十 μm レベルの厚さの差がイメージでき、電子回路基板等の薄い板状の試料の欠陥やイメージングに適用できる可能性を明らかにした。

キーワード：振動速度、超音波、圧電振動子、振動速度差、伝搬時間差、薄板状試料

1. はじめに

従来、電子デバイスの欠陥を評価する方法として、超音波非破壊検査法が多く利用されてきた。しかし一般に超音波を用いた検査では、検査対象物を水に浸し、対象物からの反射波または透過波を受波する水浸法で行われることが多い。この方法では高周波数超音波を用いた高分解能検査が可能であるが、劣化や短絡の恐れがある電子デバイスを水に浸すことは製品の信頼性の点から適当でなく、空中で検査できることが望ましいと考えられる。空中で検査を行う方法として、空中超音波を利用する方法があるが、空中では超音波の減衰が周波数に比例して大

きくなり、伝搬距離が短くなるため、MHz帯などの高周波数超音波を用いた高分解能検査^{1,2)}は困難である。さらに、水浸法および空中超音波を用いる方法はともに回折による空間分解能の低下が問題となる。したがって、これらの方法では電子デバイスの欠陥評価は困難であると考えられる。また、被検体に超音波探触子を接触させる接触法では、薄い試料の場合パルスエコー法の適用は難しく、探触子と被検体との間にバッファ等を入挿しても被検体の表面に凹凸がある場合は適用できない。

本研究では、電子デバイス等の薄い試料の欠陥等をイメージングする方法として、定電圧駆動法および光学的手法を用いて振動速度を検出するイメージング方法^{3,4)}に着目した。また、筆者らの過去の報告⁵⁾では、空中で高空間分解能測定が可能であることが示唆されており、小型の電子デバイスの欠陥評価に応用できる可能性がある。しかし、これらの報告ではいずれも音波の送波効率が低く、電子デバイスの配線や基板のような薄い試料に関するイメージングには至っていない。

* 秋田大学 理工学研究科

〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1

* Graduate school of Science and Engineering, Akita University,
1-1, Tegata Gakuen-cho Akita City, 010-8502, Japan

そこで本報告では、定電圧駆動法および光学的手法を用いて薄い振動子を用いて送波効率の向上をはかり、振動速度を検出するイメージング方法によって、0.1 mm 程度の厚さの板状金属試料のイメージングを試み、薄い試料に本法が適用できることについて述べる。

2. 圧電振動子の駆動法

圧電振動子は通常、電圧源を接続して駆動するが、駆動電圧波形と振動子の表面速度波形は一致しないことが多い。これは振動子が弾性体であり、電気的に駆動してもその後弾性体として機械に振動するためである。特にパルスを応用した計測等ではリングングと呼ばれる残留機械振動のためパルスが長くなり、時間分解能を低下させる一因となるため振動子の背面にバッキングを用いて機械的Qを下げて用いることが多い。この機械的Qは振動を表す無次元量であり、振動の損失量を表すものでもあり、パルス駆動などではQが高いことによる残留振動によってパルスが長くなり、時間分解能が低下する原因ともなる。以下ではバッキングを用いず、電圧波形の選択によって任意の振動速度を発生できることを述べる。

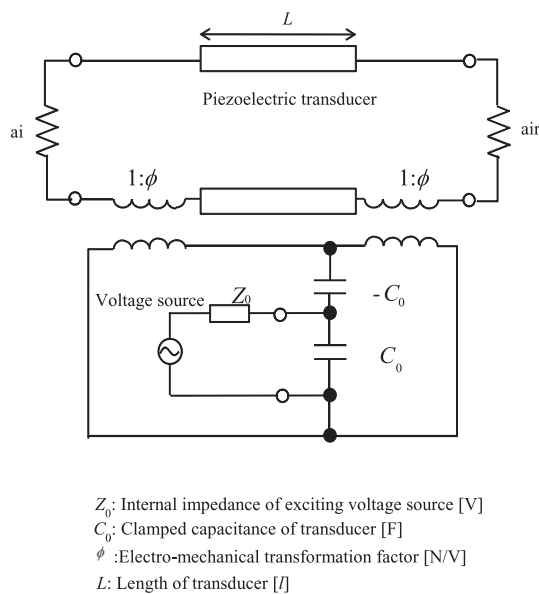


Fig.1 Electrical equivalent circuit for piezoelectric transducer.

2.1 定電圧駆動による駆動法^{3,4)}

筆者らは文献3において音波長よりも十分厚い振動子を定電圧駆動することにより任意の振動速度を発生できることを述べ、その応用についても報告している³⁾。この方法は比較的大型で厚みの大きい振動子を用いるため、振動の駆動効率が低く、イメージングを行う際のS/Nやダイナミックレンジの低下を招く。本報告では薄い振動子を用いて効率よく駆動する方法を採用する。Fig.1は圧電振動子の電気的等価回路である。この回路を用いて、駆動電源の内部インピーダンスを振動子のインピーダンスよりも十分小さく、すなわち定電圧駆動し、さらに駆動電圧波形を振動子の共振周期 $2T$ と等しい時間幅の矩形パルスとしたときの電圧波形をFig.2(a)に示す。また、同図(b)はFig.1の等価回路で計算した振動子表面振動速度波形である。この図からはほぼ1周期の正弦波状の振動波形が得られ、リングングが生じないことがわかる^{3,4)}。Fig.3は振動子の表面振動速度をレーザードップラー振動計によって振動速度を測定するシステムであり、発振器から繰り返し周波数を50 Hzとして方形波パルス電圧を発振し、内部インピーダンス1.5Ωのバイポーラ増幅器で60 Vまで増幅して圧電振動子に印加する。構成は文献3と同じものである。Fig.2(c)は振動速度の測定結果であり、計算結果であるFig.2(b)と一致していることがわかる。用いた振動子はチタン酸鉛系の圧電セラミック振動子(富士セラミックス製、M-6)で、直径40 mm、厚さ2 mmで共振周波数は1 MHz(共振周期 $2T=1 \mu s$)である。前

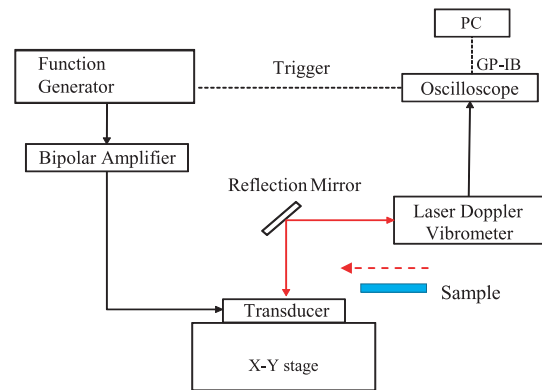


Fig.3 Measurement system for evaluating surface vibration velocity using Doppler vibrometer.

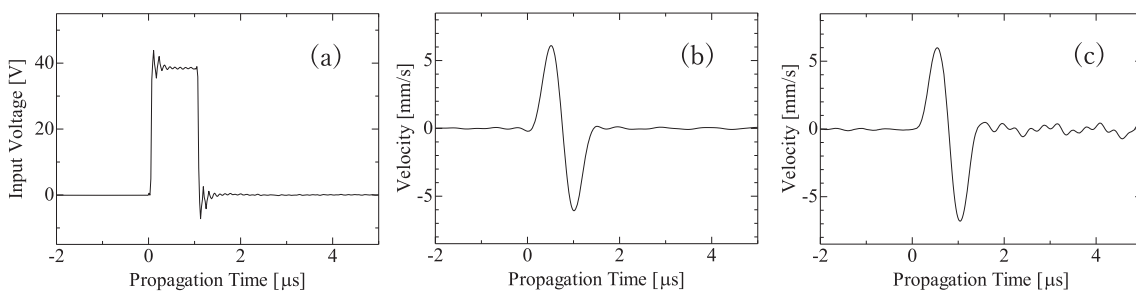


Fig.2 Exciting rectangular voltage waveform (a), calculated result using electrical equivalent circuit shown in Fig.1 (b) and vibration velocity waveform measured Doppler vibrometer shown in Fig.2 (c).

述のように文献3では直径60 mm厚さ40 mmのPZT製振動子を用いていたため振動の駆動効率が低く、100 V程度の電圧が必要だったが、本法では同じ60 V駆動でも約26 dB駆動効率が改善されることが確かめられた。

2.2 イメージング法と試料

本報告で使用するイメージングシステムはFig.3と同様であり、試料は圧電振動子の表面にグリースで固定する。使用する圧電振動子の共振周波数は1 MHzであり、前述のように圧電振動子音響放射面の振動速度のリングングを抑制するため、方形波パルス電圧のパルス幅は1 μ sとする。電圧印加時の圧電振動子音響放射面に固定した試料表面の振動速度をレーザドッ

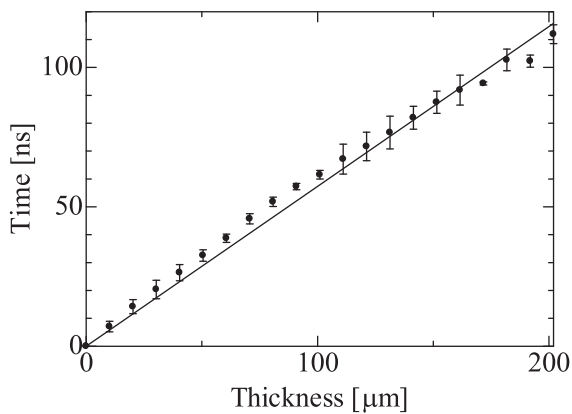


Fig. 4 Time delay of vibration velocity for various thickness of sample measured by the proposed system.

ブラ振動計で測定し、オシロスコープで波形を観測する。この波形はGP-IBを介してPCに取り込まれる。イメージングには、オシロスコープで観測される振動子表面速度と試料の表面速度の時間差を用いる。すなわち、試料中を伝搬する超音波は試料の厚さ分だけ時間が遅れて観測されることから、この時間差の情報を画像化する。Fig.4はFig.1のシステムで試料の厚さに対する時間差を測定したもので、測定データの標準偏差の値から時間差の分解能は10 ns程度であると評価できる。

2.3 イメージング結果

イメージングは薄い試料を想定して“③”の文字がエッチング処理された厚さ160 μ mの真鍮試料を使用する。この試料の外形および寸法をFig.5に示す。試料のエッチング処理されていない部分およびエッチング処理された部分の厚さの差は80 μ mであり、本手法でその差をイメージングできるか確認する。

Fig.6にイメージング結果を示す。この図から、“③”の文字が確認できる。これにより、エッチング処理された部分と処理されていない部分の厚さの差80 μ mのイメージングができていることがわかる。空中と水中で同様の時間（距離）分解能を得るにはそれぞれ4.2 MHzおよび18.8 MHzの高周波超音波を使用する必要があるが、前述のように空中ではMz帯超音波は1~2 cm程度しか伝搬できずイメージングは難しい。また、水中でもセラミック振動子を用いると振動子の厚さが50 μ m程度となり、振動子そのものの作製が難しい。本法は空中で非接触でイメージングが行える利点があり、上述の問題がない。なお、使用したエッチング試料表面にある“3”の文字の太さ

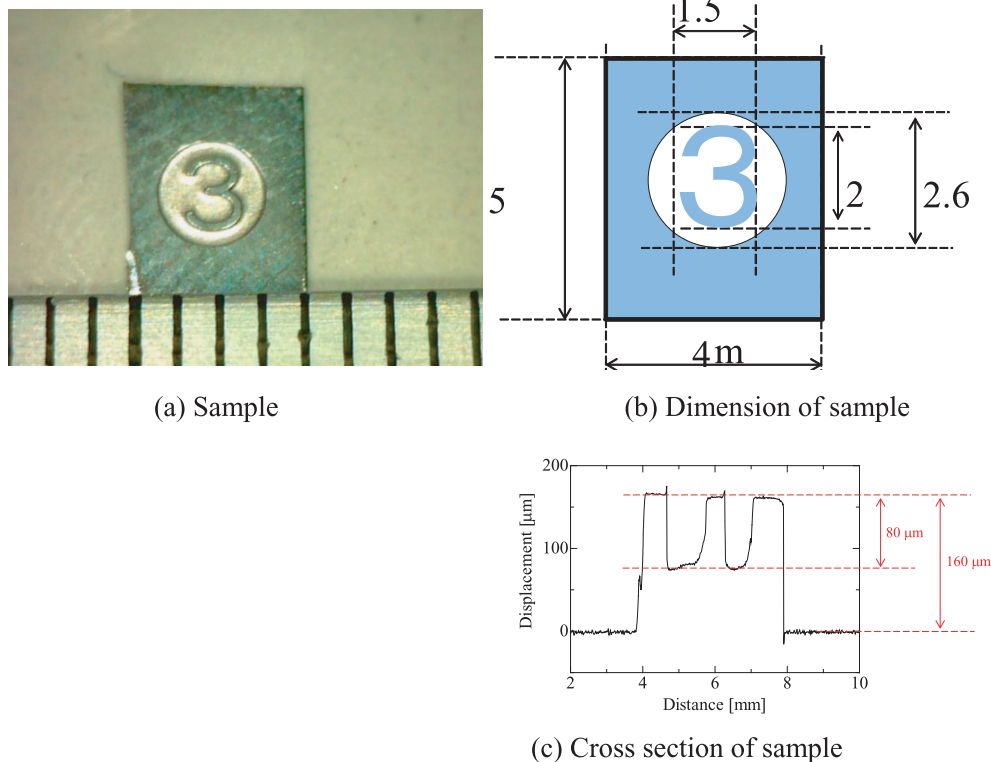


Fig. 5 Photo of the imaging sample (a), dimension of sample (b) and cross section of the sample (c).

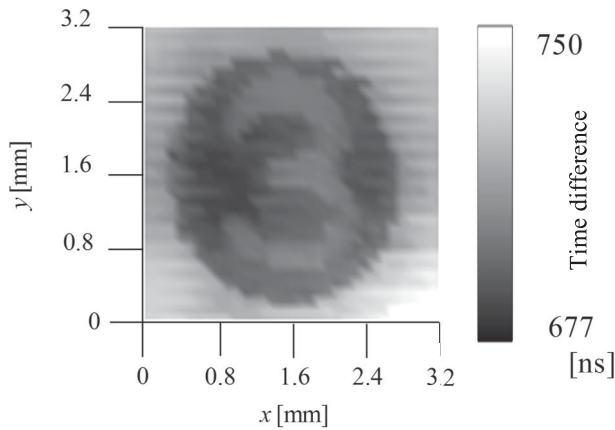


Fig. 6 Image of thin brass plate having character "3" on the surface of sample.

は約 0.3 mm であり、この文字がイメージングできていることがわかる。これは用いたレーザドップラ振動計で用いているレーザ光のビーム径 ($20\ \mu\text{m}\phi$) によって決まるもので、空間分解能が高いことがわかる。したがって、本手法・システムを用いることで、薄い試料を高い空間分解能でイメージングでき、電子デバイスの欠陥評価等に応用できる可能性があると考えられる。

3. おわりに

本報告では、定電圧駆動と薄い圧電振動子を共振の Q を落とさずに駆動効率を上げることができることを述べた。さらに光学的手法を用いて振動速度を検出するイメージング方法に関して、薄い試料のイメージングを試みた。その結果、空中でかつ非接触で薄い試料を数十 μm 程度の分解能でイメージングで

き、電子デバイス等の欠陥評価に応用できる可能性を示すことができた。

今後、振動速度の時間差だけでなく、振動子表面と試料表面の振動速度の振幅差に注目したイメージングを行う予定で、薄い試料の欠陥評価への適用についての検討を進めたい。

参 考 文 献

- 1) K. Imano and M. Kondou, "Possibilities of nondestructive evaluation of a pipe using air-coupled ultrasonic wave in the MHz range," *IEICE Elex.*, **5**, 17, (2008), pp. 668-671., DOI: <http://doi.org/10.1587/elex.5.668>.
- 2) K. Imano and M. Kondou, "Detecting pipe wall reduction using air-coupled MHz range ultrasonic wave," *IEICE Elex.*, **6**, 10, (2009), pp. 613-617., DOI: <https://doi.org/10.1587/elex.6.613>.
- 3) K. Imano: "Barker-coded Ultrasonic Imaging using Optical Surface Vibration Measurement," *Jour. Imag. Soc. Jpn.*, **53**, 6, (2014), pp. 476-479.
- 4) K. Imano (Akita University), JP-5816781 (2015).
- 5) K. Sasaki, M. Nishihira, and K. Imano: "Low-frequency air-coupled ultrasonic system beyond diffraction limit using pinhole," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, 5B, (2006), pp. 4560-4564.



今野 和彦

1979 年秋田大学鉱山学部電子工学科卒業。1979 年同大助手。1997 年同大工学資源学部電気電子工学科教授。現在に至る。この間、主として超音波計測、超音波デバイスの研究に従事。博士(工学)。1986 年日本音響学会粟屋潔学術奨励賞受賞。日本音響学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会、日本 ME 学会、IEEE、ASA、日本画像学会などに所属。