

振動速度情報を用いた薄板試料の超音波イメージング

Ultrasonic Imaging of Thin Samples Using Vibration Velocity Information

○中村 充^{*}, 今野 和彦^{*}

○mitsuru nakamura^{*}, 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), イメージング(Imaging),
振動速度(Vibration velocity), 薄板試料(Thin sample),
位相検波(Phase detection)

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 : imanoken@ee.akita-u.ac.jp

1. はじめに

現在, 超音波の使用されている分野の一つに超音波を用いたイメージングがある. 超音波を用いたイメージングは, 一般に水中で超音波を対象物に送波し, 反射波もしくは透過波を受波する方法(水浸法)が多く用いられている. 水浸法は高周波数の超音波を用いた高分解能の計測を行うことができるが, 電子デバイスなどの対象物は水中での計測により劣化や浸食, 短絡の恐れがあるため, 測定対象物に影響の少ない空中に対象物を置いた状態でのイメージングが望ましい. しかし, 音場伝搬媒質に空気を用いた計測では, 空気と固体の音響特性インピーダンスの差から送受波効率が悪く, また, 空気中での超音波の減衰により, 高周波数の超音波は使い難いため, 距離分解能は低下する.

本研究では, 空中での超音波を用いた高分解能計測方法として, 光学的手法を用いた測定対象物

の振動速度測定によるイメージング手法¹⁾に着目した. この手法は, Fig.1 に示すような, 定電圧駆動法²⁾を用いて, 圧電振動子とその共振周期より十分短いバースト正弦波で駆動することで発生する, 駆動電圧波形に時間的に相似な振動速度波形を利用する. 振動の様子は圧電振動子の音響放射面中心部において同位相同振幅の一樣な平面波であるため, この平面波を試料に作用させ, 試料表面の振動速度をレーザドップラ振動計等を用いて測定することで, 振動速度の変化から試料のイメージングを行うことができる. 過去の報告^{2,3)}では, 実際に水中で劣化や短絡の恐れのある電子部品等に対する, 本計測方法を用いたイメージングは行われていない. そのため, 本研究では測定対象物を基板材料と置き, まず, 基板材料の導電体部分の厚さに近い μm オーダの薄板試料の計測を行う. その後, 基板の表面形状のイメージングおよび, 裏面形状の計測を行う.

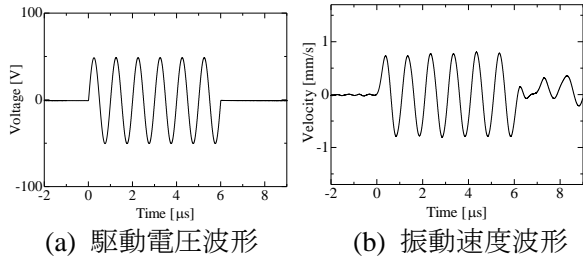


Fig.1 定電圧駆動方法

2. 振動速度の計測方法

本研究で用いるイメージング手法は、試料の厚さの変化に応じた伝搬時間の变化を測定することで試料形状のイメージングを行う。また、伝搬時間差検出は、振動速度波形の位相の変化から計測を行う。

試料の厚さの変化を Δz と置き、伝搬時間差を τ とすると、試料の音速 c を用いて次式で表すことができる。

$$\tau = \frac{\Delta z}{c} \quad (2-1)$$

伝搬時間の測定には、振動速度波形と参照波を用いた同期検波による位相差を用いる。振動速度波形 $r(t)$ と参照波 $u(t)$ を次式のように定義する。

$$r(t) = \begin{cases} A_r \sin(\omega_s t - \delta_s - \phi(z)) & \tau \leq t \leq \tau + T \\ 0 & 0 \leq t < \tau, \tau + T < t \end{cases} \quad (2-2)$$

$$u(t) = A_u \sin(\omega_u t - \delta_u) \quad (2-3)$$

ここで A_r は振動速度振幅、 $\omega_s = 2\pi f_s$ であり f_s は駆動電圧の周波数、 δ_s は駆動電圧の固定位相、 t は時間、 $\phi(z)$ は厚さ Δz の変化による位相差、 A_u は参照波の振幅、 $\omega_u = 2\pi f_u$ であり f_u は参照波の周波数、 δ_u は参照波の固定位相である。また検波対象信号と参照波の初期位相差 δ は次式で与えられる。

$$\delta = \delta_u - \delta_s \quad (2-4)$$

振動速度波形 $r(t)$ と参照波 $u(t)$ の乗算を行い、周波数を同値に設定 ($f_s = f_u$) することで次式が得られる。

$$r(t)u(t) = \frac{A_r A_u}{2} \{ \cos[\delta - \phi(z)] - \cos[2\omega_s t - \delta_u - \delta_s - \phi(z)] \} \quad (2-5)$$

また、低域フィルタを通し $2f_s$ 付近の周波数をカットすることで、次式に示すような直流成分を得ることができる

$$r(t)u(t) = \frac{A_r A_u}{2} \cos(\delta - \phi(z)) \quad (2-6)$$

この直流成分を位相検波出力として用い、位相と伝搬距離の関数 $P(\delta, z)$ とする。(2-6)式において、初期位相差 δ を 0 と $\pi/2$ に設定したときの位相検波出力を、 $P(0, z)$ 、 $P(\pi/2, z)$ と置き、正弦接を求め、位相差 $\phi(z)$ は次式のように表すことができる。

$$\phi(z) = \tan^{-1} \left[\frac{P(\pi/2, z)}{P(0, z)} \right] + n\pi \quad (2-7)$$

位相差は $0 \sim \pi/2$ の間で測定が可能であるが、1周期以上の位相差がある場合、 $n\pi$ ($n=2,4,6\dots$) を加算することで表される。

3. 位相検波を用いた時間差測定

位相差検出による、振動速度波形の伝搬時間差測定における時間分解能を把握するため、駆動電圧波形に立ち上がり遅延時間を与えた時の振動速度波形に現れる時間変化の測定を行う。測定間隔は $0 \sim 30$ ns まで 1 ns 間隔の測定で行う。時間差 τ の算出には次式を用いる。

$$\tau = \frac{\phi(z)[\text{deg}]}{f_s \times 360} \quad [\text{sec}] \quad (3-1)$$

測定結果を Fig.2 に示す。時間差測定結果における分散値は 0.37 ns となり、オシロスコープの時間分解能 (2 ns) と比べ、小さな結果となった。

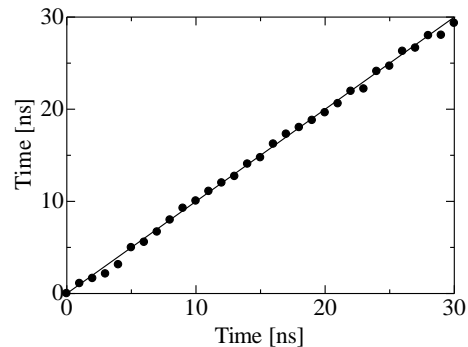


Fig.2 時間差測定結果

4. 薄板試料の超音波伝搬時間差測定

基板材料のイメージングを行うためには、 μm オーダの厚さ変化を読み取ることが可能でなくてはならない。そのため、イメージングを行う基礎段階として、 μm オーダの薄板試料の測定を行う。測定対象には、アルミニウム箔試料(厚さ 0.01 mm)を用いる。アルミニウム箔試料を 1 枚ずつ重ね、試料の厚さが増えたときの伝搬時間の変化を読み取る。

4-1. 測定システム

Fig.3 に示す測定システムを用いて測定を行う。圧電振動子の駆動条件は、振幅 $250\text{ V}_{\text{p-p}}$ 、周波数 1 MHz、波数 6 波のバースト正弦波とする。圧電振動子音響放射面の中心部にアルミニウム箔を接着させ、アルミニウム箔表面の振動速度波形を測定し、VSA を用いて位相検波を行い、位相差から伝搬時間の変化を算出する。

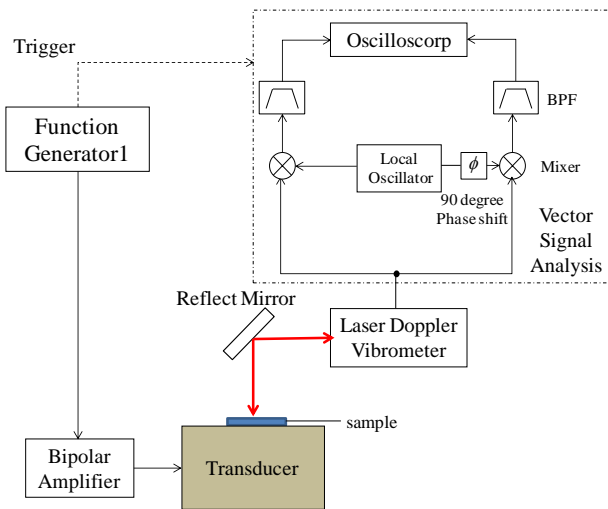


Fig.3 測定システム

4-2. 測定結果

Fig.4 に測定結果を示す。横軸にマイクロメータを用いた厚さの測定結果を、縦軸に伝搬時間差の測定値を示す。アルミニウム箔 1 枚の厚さを 0 と置き、0 を通るように最小二乗法を用いて直線を引く。最小二乗法を用いて描いた直線の傾きから算出したアルミニウム箔 1 枚当たりの伝搬時間差は 1.82 ns となった。また、マイクロメータを用い

た厚さの測定値と、アルミニウムの音速⁴⁾(6260 m/s)から算出したアルミニウム箔 1 枚の伝搬時間は 1.80 ns となり、差は 1.1% となった。この結果から μm オーダの試料の伝搬時間の変化を測定することができたと考えられる。

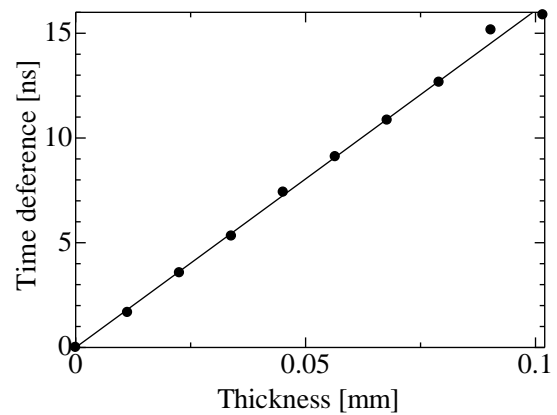


Fig.4 薄板試料伝搬時間測定結果

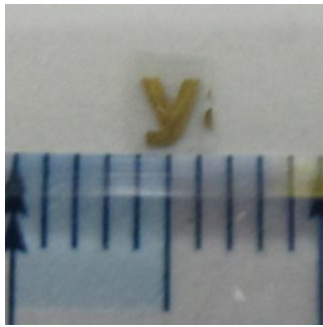
5. 基板試料表面形状のイメージング

基板の表面形状のイメージングを行う。測定対象物にはシール基板を用いる。希望のパターンを切って使える基板であり、ユニバーサル基板上や、回路変更の際に使用される。

5-1. 測定方法

Fig.3 に示す測定システムを用いて測定を行う。試料部分をシール基板と置き、基板表面の振動速度測定を行う。 x - y ステージを用いてレーザを試料表面で走査させ、振動速度の分布図を測定する。振動速度分布図において伝搬時間の変化を読み取ることで、厚さの変化を計測し、その値をプロットすることで、試料表面形状の画像を取得する。試料の接着にはサリチル酸フェニルを用いる。測定時の圧電振動子の駆動条件は、振幅 $250\text{ V}_{\text{p-p}}$ 、周波数 1 MHz、波数 6 波のバースト正弦波とする。Fig.5 に測定対象試料を示す。基板の材料はガラス繊維にエポキシ樹脂を含浸させたものである。導電体部分の材料は、銅箔を加熱処理したものであり、銅箔表面は下地ニッケルに金メッキ仕上げされている。それぞれの材料の厚さは、ガラスエポキシが 0.1 mm 、銅箔が $32\text{ }\mu\text{m}$ 、金メッキが $3\text{ }\mu\text{m}$

である。銅箔部分はアルファベットで「y」と書かれており、アルファベット部分の縦×横の寸法は2.3 mm×2.2 mmである。測定範囲は、アルファベットが中心になるように2.6 mm×2.6 mmと設定し、0.1 mm 間隔でレーザを走査させ、27×27=729 点の測定を行う。



(a) シール基板の外形



(b) シール基板の断面図

Fig.5 測定対象試料

5-2. 測定結果

Fig.6 にイメージング結果を示す。測定結果において、銅箔部分とガラスエポキシ部分の時間差の平均は 13.3 ns となり、銅箔部分の厚さと音速⁴⁾から算出した値との差は 53.8 % となった。測定値と計算値の誤差が生じた要因として以下の3点が考えられる。

①試料の特性

基板材料がガラス繊維にエポキシ樹脂を含浸させたものであり、音響特性が一様でなかったためだと考えられる。

②接着層の影響

今回、試料と圧電振動子の音響接合剤としてサリチル酸フェニルを使用した。接着層の厚さは約 5 μm であり、サリチル酸フェニルの音速 2700 m/s⁵⁾から、時間として 1.85 ns の影響があったと考

えられる。

③レーザのスポット径

レーザ光が銅箔とガラスエポキシを同時に測定している点があるため、銅箔の縁の部分になまっているような画像が取得されたと考えられる。

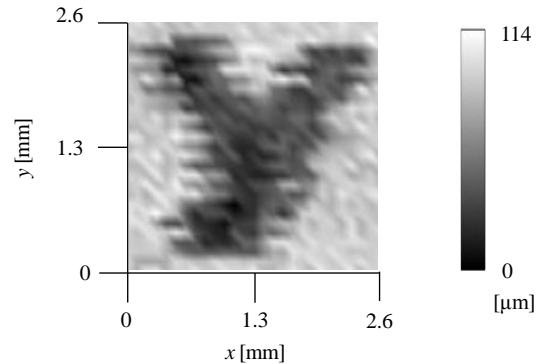


Fig.6 イメージング結果

6. 試料裏面の形状の計測

6-1. 測定方法

Fig.3 に示す測定システムを用いて測定を行う。圧電振動子の駆動条件は、振幅 250 V_{p-p}、周波数 1 MHz、波数 6 波のバースト正弦波とする。Fig.7 に測定対象試料を示す。銅箔側を圧電振動子に接着させ、裏面の振動速度を測定する。試料の銅箔のない部分は接着層で満たされるようにする。銅箔側を表面としたとき、表面と裏面の形状を、レーザ変位計を用いて測定した結果を Fig.8 に示す。銅箔側からは表面形状の変化を測定することができるが、ガラスエポキシ側からは表面形状の変化を測定することができないことが分かる。測定範囲は、レーザを銅箔のない部分を通るように x 軸方向に走査させ、0 mm~6.0 mm まで 0.1 mm 間隔で測定する。測定結果は時間差として表す。

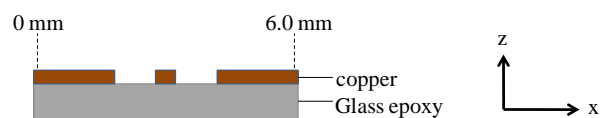


Fig.7 測定対象試料

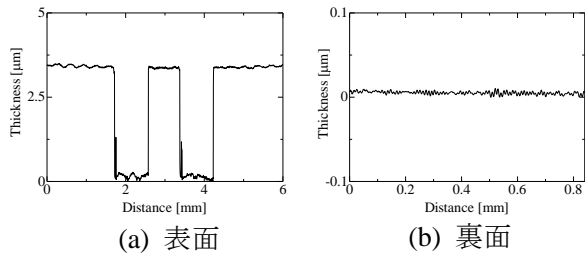


Fig.8 レーザ変位計を用いた形状測定結果

6-2. 測定結果

測定結果を Fig.9 に示す. 今回の測定において, 銅箔のない部分は接着層(サリチル酸フェニル)で満たされている. そのため, 振動速度波形に表れる時間差は 35 μm の厚さの銅箔と, 35 μm の厚さのサリチル酸フェニルを伝搬媒質として超音波が伝搬する時間差である. 二つの材料の音速^{4,5)}から, 時間差を算出すると, 振動速度波形に表れる時間差は 5.5 ns となる. また, 測定結果から, 銅箔のある部分の時間分布の平均値(時間)と, 銅箔のない部分の時間分布の平均値(時間)の差(時間差)を測定値から算出すると, 5.3 ns となった. 音速から算出した値と実験による測定値を比較すると, 差は 3.6 % となり, 表面からは分からない裏面の形状の測定において, 銅の音速を当てはめて考えると, 5 μm 以下の厚さ変化の測定が可能になると考えられる.

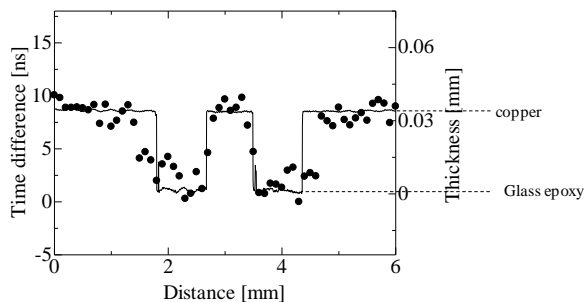


Fig.9 測定結果

7. おわりに

本研究では基板のイメージングを目的とし, 基板の表面形状と裏面形状の計測が可能であることを示すことができた. 今後の課題として, 裏面形状の画像化, より薄い試料の伝搬時間測定等が挙げられる.

《参考文献》

- 1) 今野和彦：“特開 2012-122860「イメージング方法およびイメージング装置」”, (2010)
- 2) 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, (2013)
- 3) 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」講演論文集, pp.11-12, (2013)
- 4) 超音波便覧編集委員会：“超音波便覧”, 丸善株式会社, pp.734-725.1319, (1999)
- 5) 荒川元孝, 榎引淳一：“バルク超音波パルスを用いた音速測定における接着層の影響の補正” 信学技法 US 101, pp.15-22, (2001)