

位相シフト法を用いた固体試料の音速測定に関する一検討

A Method for Measuring Sound Velocity in Solid Sample Using Phase Shifting

○石井 亮治*, 今野 和彦*

○Ryoji Ishii*, 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), 音速測定(Measuring sound velocity),
振動速度(Vibration velocity), 固体試料(solid 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

超音波を用いた測定では、試料の音速測定、欠陥検出、医療診断などが行われている。これらの超音波測定では、パルス反射法を使用するケースが多い。パルス反射法は、測定対象に探触子を当て、測定対象に超音波を送波し、欠陥や、底面で超音波を反射させ、その反射した超音波を探触子で受波する。この受波した反射波の伝搬時間から、音速測定などを行う¹⁾²⁾³⁾。パルス反射法は伝搬時間が短い場合、入射波と反射波が多重反射により混在し、定在波が生じ伝搬時間を測定することができない。更に、伝搬時間の測定には機器の時間分解能に応じて、精度が決めるため、薄い試料および音速の速い試料における短い伝搬時間の測定は難しいとされている。このため、多重反射の影響を少なくする方法および時間分解能を向上する方法が求められている。そこで本研究では位相検波を

用いた音速測定について報告する。

本発表題目に示している位相シフト法について検討した結果、位相検波による音速測定の方が測定に適していることがわかったため、本発表では位相検波を用いた音速測定を行う。

2. 位相検波

本研究の音速測定は圧電振動子表面および試料表面の振動速度波形における時間差(伝搬時間)を、参照波を用いた同期検波することで位相差として求める。振動速度波形 $r(t)$ と参照波 $u(t)$ を(2-1)式、(2-2)式のように定義する。

$$r(t) = \begin{cases} A_r \sin(\omega_s t - \delta_s - \phi(z)) & \tau \leq t \leq \tau + T \\ 0 & 0 \leq t < \tau, \tau + T < t \end{cases} \quad (2-1)$$

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

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(2-3)式となる.

$$\delta = \delta_u - \delta_s \quad (2-3)$$

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(2-4)式が得られる.

$$r(t)u(t) = \frac{A_r A_u}{2} \left\{ \cos[\delta - \phi(z)] - \cos[2\omega_s t - \delta_u - \delta_s - \phi(z)] \right\} \quad (2-4)$$

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, (2-5)式に示すような直流成分を得ることができる

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

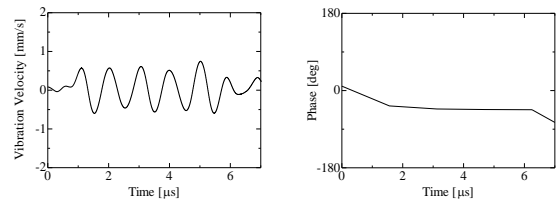
この直流成分を位相検波出力として用い, 位相と伝搬距離の関数 $P(\delta, z)$ とする. (2-5)式において, 初期位相差 δ を 0 と $\pi/2$ に設定したときの位相検波出力を, $P(0, z)$, $P(\pi/2, z)$ と置き, 正弦接を求めることで, 位相差 $\phi(z)$ は(2-6)式のように表すことができる.

$$\phi(z) = \tan^{-1} \left[\frac{P(\pi/2, z)}{P(0, z)} \right] + n\pi \quad (2-6)$$

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⁴⁵⁾.

位相検波の一例を Fig.1 に示す. 振動速度波形および位相検波出力が時間に対して測定されるため, 多重反射が混在しない時間の位相に着目することで, 多重反射の影響を無くすことができる. また, パルス反射法の時間分解能は測定機器の時間分解能に依存するのに対し, 位相検波における時間分解能 $\Delta\tau$ は(2-7)式のように位相検波器の位相分解能 $\Delta\phi(z)$ と駆動電圧の周波数 f_s によって決まるため, 周波数を高くすることで分解能が向上すると考えられる.

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\phi(z)[\text{deg}]}{f_s \times 360} \quad [\text{sec}] \quad (2-7)$$



(a) 振動速度波形 (b) 位相検波出力

Fig.1 位相検波の一例

3. 圧電振動子の定電圧駆動

本研究では圧電振動子を定電圧駆動することで超音波を発生させる. 定電圧駆動は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ることにより行うことができる. 圧電振動子を定電圧駆動した際の振動速度波形は駆動電圧波形と時間的に相似に近い振動速度波形になることが知られている⁶⁷⁾. Fig.2 に圧電振動子音響放射面の振動速度波形を計算する等価回路を示す. Fig.3 の入力電圧と振動速度波形から, 十分に小さくした電源インピーダンス (1.5Ω) における, 等価回路を計算することで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.

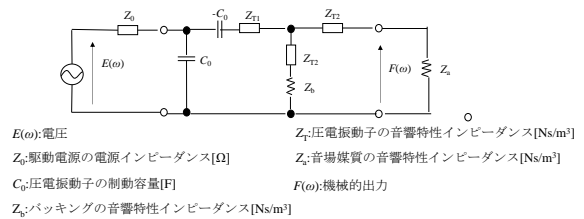
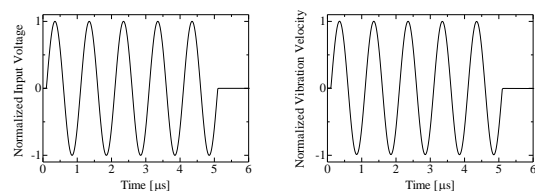


Fig.2 等価回路



(a) 入力電圧 (b) 振動速度波形

Fig.3 計算結果

このことから, 位相検波に用いるバースト正弦波の入力電圧を圧電振動子に印加することで時間的に相似なバースト正弦波の出力振動

速度波形を得ることが出来る。

4. 振動速度波形の位相差測定

本手法において振動速度波形の時間差を位相差で測定できるか確認するため、振動速度波形に時間差を与えその時の出力位相差を確認する。

Fig.4 に示す測定システムを用いて測定を行う。ファンクションジェネレータ(NF WF1974)からの信号を増幅器(NF HSA4101)によって振幅を増幅し、圧電振動子に印加する。圧電振動子の諸特性は共振周波数 26.5 kHz, 厚さ 40 mm, 直径 60 mm である。圧電振動子の駆動条件は、振幅 100 V_{p-p}, 周波数 1 MHz, 波数 5 波のバースト正弦波とする。駆動した圧電振動子音響放射面の中心部の振動速度をレーザドップラ振動計(グラフテック AT0023 AT3700)を用いて測定し、その出力を位相検波器である Vector Signal Analyzer(Agilent 89600B)とオシロスコープ(Agilent 54845A)に入力し、それぞれ、位相差と振動速度波形を測定する。Vector Signal Analyzer の遅延機能を用いて、0μs から 1 μs まで 0.1 μs 毎に振動速度波形に時間差を与える。このときの位相差をまとめたものを Fig.5 に示す。時間差に対して位相差が線形に変化していることが確認できる。このことから、本手法は時間差を位相差で測定できるといえる。

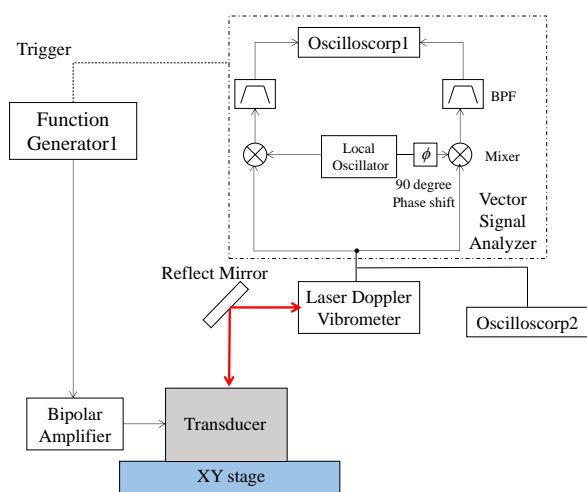


Fig.4 測定システム

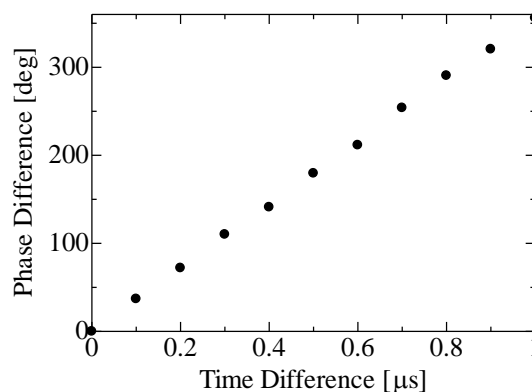


Fig.5 時間差に対する位相差

5. アルミニウム片の音速測定

本手法において時間差が測定できることから固体試料の音速も可能であると考え、Fig.4 の測定システムを同様に用いて、圧電振動子音響放射面にサリチル酸フェニル(和光純薬工業)を用いて接着したアルミニウム片の音速測定を行う。ファンクションジェネレータ(NF WF1974)からの信号を増幅器(NF HSA4101)によって振幅を増幅し、圧電振動子に印加する。圧電振動子の駆動条件は、振幅 100 V_{p-p}, 周波数 1 MHz, 波数 5 波のバースト正弦波とする。駆動した圧電振動子音響放射面およびアルミニウム片表面の振動速度をレーザドップラ振動計(グラフテック AT0023 AT3700)を用いて測定し、その出力を Vector Signal Analyzer(Agilent 89600B)とオシロスコープ(Agilent 54845A)に入力し、それぞれ、位相差と振動速度波形を測定する。アルミニウム片の寸法は厚さが 2 mm と 3 mm の 2 種類で、10 mm 四方とする。測定位置はアルミニウム片中央から辺方向に ±0.5 mm の範囲を 0.1 mm 毎に 5 回測定する。測定位置の移動には XY ステージ(シグマ光機 SG SP26-100)を用いた。

Fig.6 に厚さ 2 mm のアルミニウム片表面と圧電振動子表面の振動速度波形を示す。このように、試料表面では振動速度波形に時間差が生じることが確認できる。両波形の時間差をピーク値で読み取り音速に直すと 6900 m/s となる。同様に 3 mm においては 5790 m/s となった。

Fig.7に厚さ2 mmのアルミニウム片表面と圧電振動子表面の位相差を示す。両波形の位相差から(2-7)式を応用して時間差を求め音速に直すと 6205 m/s となった。このように、位相差から全ての測定点において音速を求めた結果を Fig.8 に示す。2 mm の音速測定値の平均は 6242 m/s, 3 mm は 5927 m/s となった。また、結果の一検討として、試料の音速および厚さを測定する装置である超音波厚さ計(日本マテック 1060LSW(B))を用いて試料の音速を測定した結果、2 mm では 6200m/s, 3 mm では 6090 m/s となったため、振動速度波形のピーク値を用いた音速測定より、位相検波し位相差から音速を求めた方がより正確に音速測定を行えている可能性があるといえる。

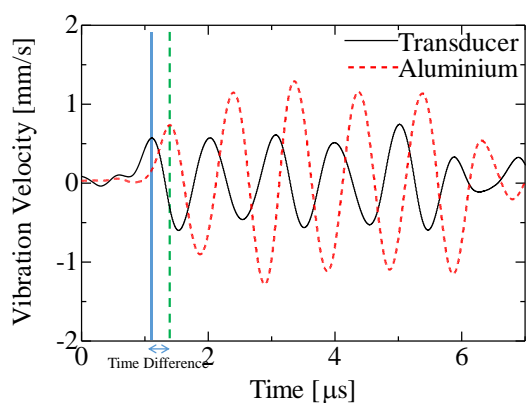


Fig.6 アルミニウム片 2 mm の振動速度波形

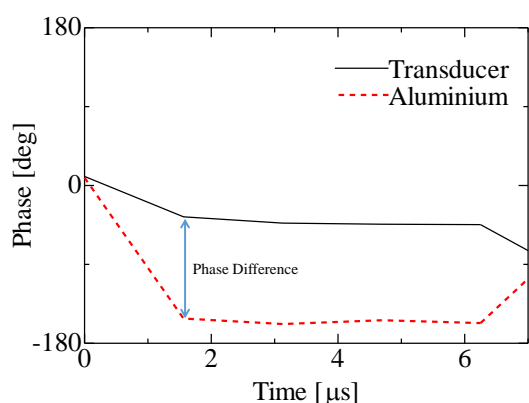
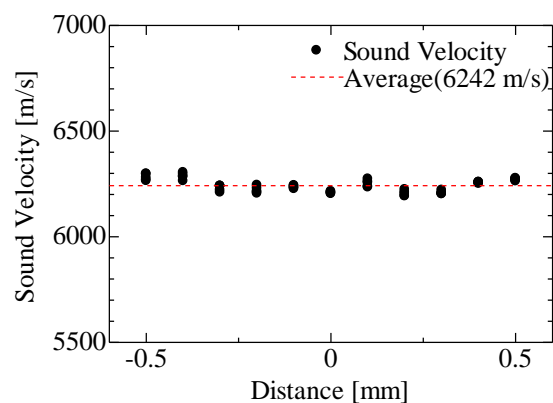
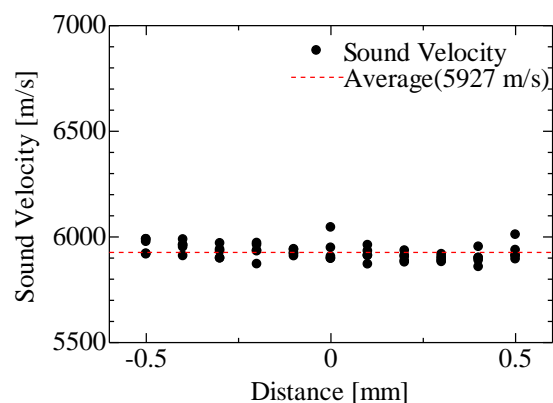


Fig.7 アルミニウム片 2 mm の位相差



(a) 2 mm



(b) 3 mm

Fig.8 アルミニウム片の音速分布

6. おわりに

本研究は振動速度波形の時間差を、位相検波による位相差から求め、固体試料の音速測定を行った。その結果、本手法において音速測定が可能であることがわかった。今後の課題として、更に薄い試料で実験を行い、どの程度の薄さまで測定できるか確認する。本実験では接着層の影響を考慮していないので、今後検討する必要がある。

《参考文献》

- 1)吉川育太郎：“超音波探傷法”，pp.2, 日刊工業新聞社(1974)
- 2)今野和彦, 奥山大太郎, 中鉢憲賢：“透過法による薄板およびフィルム状試料の音速測定の一方法”，電子情報通信学会論文誌, Vol75-10, pp.1600-1602(1992)
- 3)石井亮治, 今野和彦：“符号化パルス超音波を用いた薄板試料の音速測定” 計測自動制御学会東北支部 50 周年記念学術講演会, C206,

pp.101-104, (2014)

4) 佐々木克浩, 西平守正, 今野和彦: “40 kHzの空中超音波を用いた nm 領域の変位検出法”

電子情報通信学会 US2004-39, pp1-6, (2004)

5) 中村充, 今野和彦: “振動速度情報を用いた薄板試料の超音波イメージング” 計測自動制御学会東北支部, 試料番号 287-3, (2014)

6) 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, 25-1/2, pp.13-19(2013)

7) 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, 53-11, pp.857-863 (1997)