

電源インピーダンスの変化に伴う圧電振動子の振動特性の測定

Measurement of Vibration Characteristics of Piezoelectric Transducer with Electric Source Impedance

○吉田 舜¹, 今野 和彦²

○Shun Yoshida¹, Kazuhiko Imano²

¹秋田大学 大学院工学資源学研究科

¹Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

²秋田大学 大学院理工学研究科

²Graduate School of Engineering Science, Akita University

キーワード: 圧電振動子(Piezoelectric Transducer), 共振周波数(Resonance Frequency)
反共振周波数(Antiresonance Frequency), 電源インピーダンス(Electric Source Impedance),
振動速度(Vibration Velocity)

連絡先: 〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 大学院理工学研究科

数理・電気電子情報学専攻 電気電子工学コース

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, 超音波の送受波などに広く用いられている圧電振動子にはその使用用途によって様々な周波数帯や形状のものがある. 円板圧電振動子は最もよく用いられており, 円板がピストン状に振動することにより振動子前方方向に遠方の音場ができ, 他の形状の圧電振動子に比べ前方方向での指向性が高いなどの特徴を持っている^[1]. 圧電振動子における特性の一つとして共振周波数がある. 共振周波数とは圧電振動子のインピーダンスが最も低くなるときの周波数であり, 圧電振動子を装置に組み込んで使用する際に重要な要素となる. 圧電振動子を駆動する際の駆動回路において, 圧電振動子表面の機械的な負荷以外にも電源インピーダンスによる電氣的な負荷が変化することによ

って圧電振動子の共振周波数が増える. また, 電氣的な負荷が増えることによって圧電振動子表面の振動分布にも変化が生じると考えられる. これより, 電源インピーダンスの変化による圧電振動子の振動特性を把握することで, 圧電振動子を電源インピーダンスの異なる機器に接続して使用する場合に適した駆動条件を知ることができると考えられる. これまでは, 矩形板圧電振動子をステップ駆動した過渡応答電流波形における周波数スペクトルのピーク値の測定や, 円板圧電振動子を連続波で駆動した場合の振動速度分布の測定についての報告があった^{[2],[3]}.

本研究では, バースト正弦波駆動した円板圧電振動子の振動特性を測定するために, 可変抵抗を用いて圧電振動子から見た電源インピー

ダンスを変化させ、共振周波数や振動速度分布の変化について測定を行う。

2. 圧電振動子の特性

2.1 圧電振動子の電氣的等価回路

圧電振動子の共振周波数付近における電氣的特性は Fig.1 に示す等価回路で表すことができる。これは、圧電振動子が自由に振動可能な場合の等価回路であり、RLC 直列回路枝とそれに並列に接続された制動容量枝 C_0 で表すことができる。また、RLC 直列回路は機械系における圧電振動子の振動に対応する素子として表されており、圧電振動子の電氣端子から振動子を見たインピーダンス Z は次式のように表される。

$$Z(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0 + \frac{1}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}} \quad (2-1)$$

2.2 圧電振動子の一次元振動解析

Fig.1 に示す圧電振動子の等価回路は、共振周波数付近における電氣機械変換の様子を表すのに適した形である。しかし、この圧電振動子の電氣的等価回路では、共振時以外を含む周波数領域で考えることができない。そのため、有限長伝送線路モデル^[3]を用いて圧電振動子の共振時や共振以外の周波数領域での一次元解析を行う。

Fig.2 に圧電振動子と駆動電源、電源インピーダンス R_s からなる圧電振動子の伝送線路モデルを示す。圧電振動子の変成比 ϕ は電氣-音響変換を表している。また、圧電振動子の振動面に接する機械的負荷を Z_F とする。負荷が半無限長で音波の反射が無ければ純抵抗で表すことができる。そして、圧電振動子の音響放射面における振動速度を、数値計算で算出された結果と実験結果の比較を行う。

3 圧電振動子の共振周波数測定

3.1 使用する圧電振動子

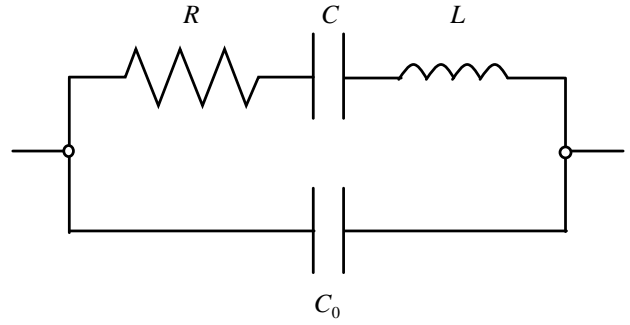
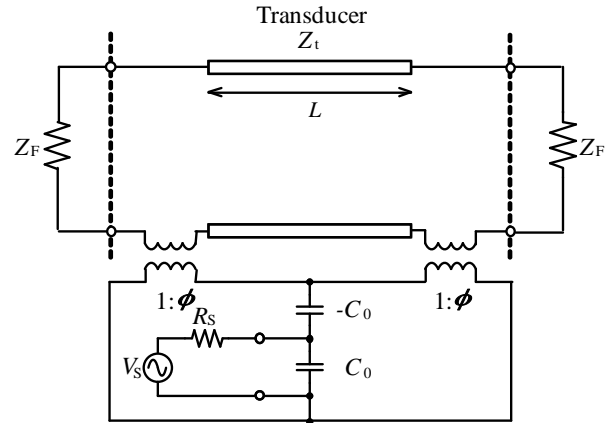
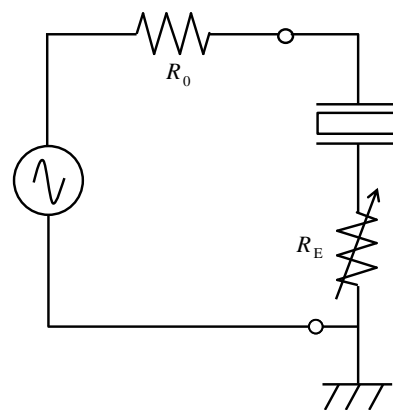


Fig.1 共振時における圧電振動子の等価回路



- Z_F : 振動子に接している媒質の機械特性インピーダンス[Ns/m²]
- Z_i : 振動子の音響特性インピーダンス[Ns/m²]
- C_0 : 振動子の制動容量[F]
- R_s : 電源インピーダンス
- ϕ : 電氣機械変成比[N/V]
- L : 圧電振動子の縦方向の長さ[m]
- γ : 伝搬定数 $\gamma = \alpha + j\beta$ (α : 減衰定数[Np/m] β : 位相定数[rad/m])

Fig.2 伝送線路モデル



- R_E : 可変抵抗
- R_0 : 電源内部抵抗

Fig.3 測定回路

本研究で使用する圧電振動子は直径 40 mm、厚さ 2.1 mm の円板のチタン酸鉛系磁器である。共振周波数 1.0 MHz のものを使用する。

3.2 測定回路

本研究の測定回路を Fig.3 に示す. 測定には発振器, 圧電振動子, 可変抵抗器 R_E を用いる. 出力インピーダンスは $R_0 = 1.5 [\Omega]$ であり, 圧電振動子側から見た電源インピーダンス R_s は次式となる.

$$R_s = R_0 + R_E = 1.5 + R_E \quad (3-1)$$

ここで, Fig.3 より可変抵抗 R_E を変化させることにより電源インピーダンス R_0 を変化させることができる. 電源インピーダンス R_s と圧電振動子の制動容量 C_0 の積から Fig.3 の測定回路の時定数 τ は次式となる.

$$\tau = C_0 R_s \quad (3-2)$$

また, 圧電振動子内での音波の伝搬時間 T [s] は, 次式となる.

$$T = \frac{L}{v} = \frac{L}{2f_r L} = \frac{1}{2f_r} \quad (3-3)$$

ここで, v : 圧電振動子内の音速[m/s], f_r : 圧電振動子の共振周波数[Hz], L : 圧電振動子の厚さ[m]である. 時定数は圧電振動子によって値が異なるため, (3-2)式と(3-3)式の比をとった τ/T で規格化しパラメータとして用いる.

3.3 測定システム(負荷:空気)

本研究で用いる測定システムを Fig.4 に示す. 発振器(Agilent 33250A)からバースト正弦波 10 波の信号を発振する. バイポーラ増幅器(NF HSA4101)により増幅した信号を圧電振動子に印加する. τ/T を 0.01 ~ 10.0 まで変化させ, 各条件における圧電振動子中心部分における表面の振動速度をレーザードップラ振動計 (GRAPHTEC AT3700 L-012) で受波し, オシロスコープ(Agilent DSOX-3014A)に取り込み測定する. 周波数の設定は, τ/T の変化に対する圧電振動子の共振周波数を測定するため, 各 τ/T の値に対して 0.98 MHz ~ 1.15 MHz まで 5 kHz ずつ変化させて測定を行い, 数値計算の結果と比較を行う.

3.4 測定システム(負荷:水)

本研究で用いる測定システムを Fig.5 に示す.

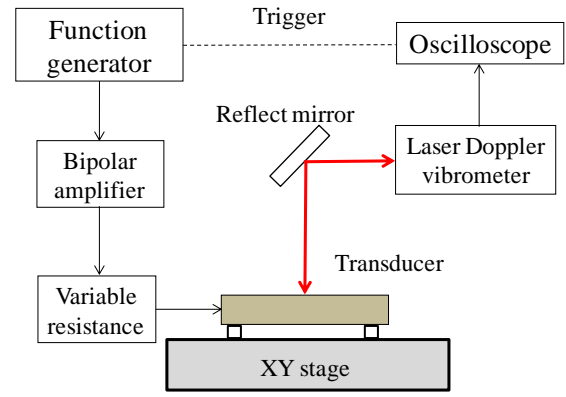


Fig.4 測定システム(負荷:空気)

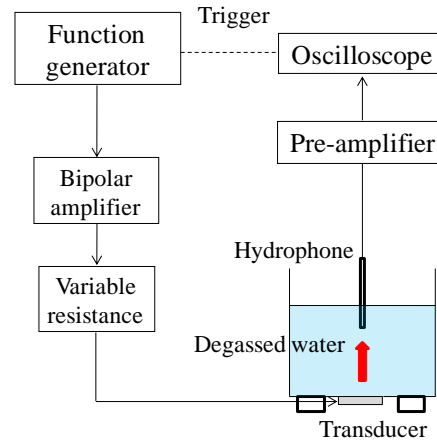


Fig.5 測定システム(負荷:水)

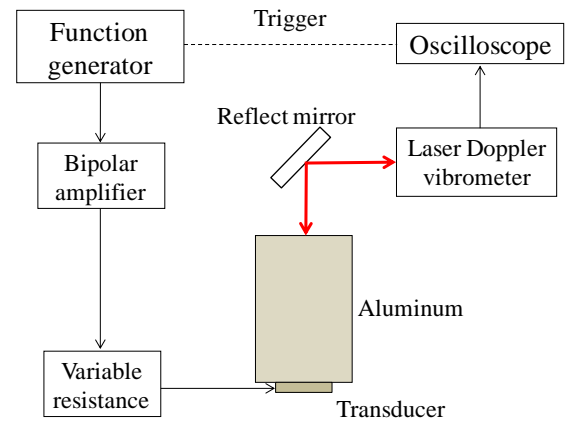


Fig.6 測定システム(負荷:アルミ)

発振器(Agilent 33250A)からバースト正弦波 5 波の信号を発振する. バイポーラ増幅器(NF HSA4101)により増幅した信号を圧電振動子に印加する. τ/T を 0.01 ~ 10.0 まで変化させ, 水中を伝搬した音波をハイドロホンで受波し, オ

シロスコープ(Agilent DSOX-3014A)に取り込み測定する。周波数の設定は3.3と同様である。

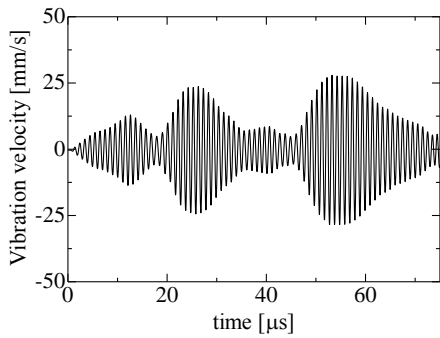
3.5 測定システム(負荷:アルミ)

本研究で用いる測定システムをFig.6に示す。発振器(Agilent 33250A)からバースト正弦波5波の信号を発振する。バイポーラ増幅器(NF HSA4101)により増幅した信号を圧電振動子に印加する。 τ/T を0.01~10.0まで変化させ、アルミニウム表面の振動速度をレーザードップラ振動計(GRAPHTEC AT3700 L-012)で受波し、オシロスコープ(Agilent DSOX-3014A)に取り込み測定する。周波数の設定は3.3と同様である。

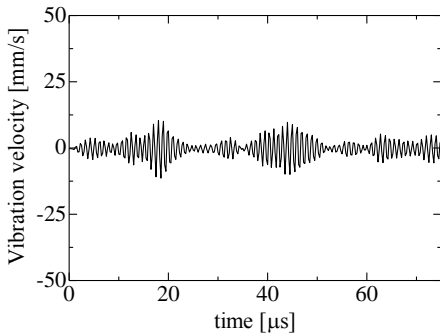
3.6 測定結果と考察

Fig.7に空気を負荷とした場合における振動速度波形($\tau/T=0.01$)の一例を示す。また、 τ/T を変化させた場合の各周波数に対する、それぞれの振幅値の実験結果及びに計算結果をFig.8, 9, 10に示す。また、 τ/T に対するピーク周波数の変化をFig.11に示す。

Fig.7より、圧電振動子は信号が印加され出力

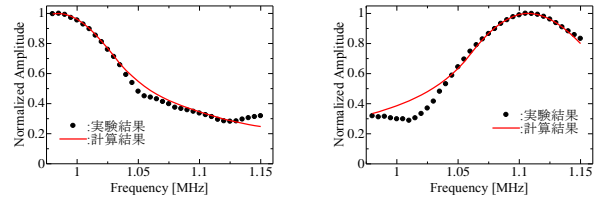


(a) 周波数 1.00 MHz



(b) 周波数 1.10 MHz

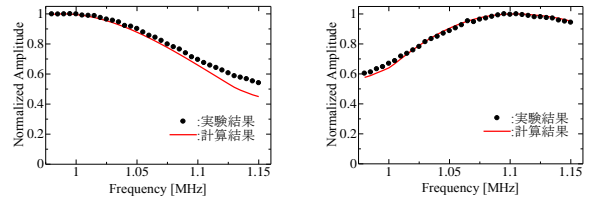
Fig.7 振動速度波形($\tau/T=0.01$, 負荷:空気)



(a) $\tau/T = 0.01$

(b) $\tau/T = 10.0$

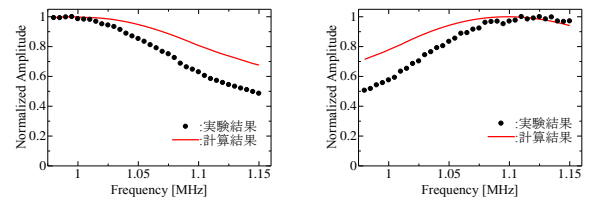
Fig.8 各周波数に対する振幅値(負荷:空気)



(a) $\tau/T = 0.01$

(b) $\tau/T = 10.0$

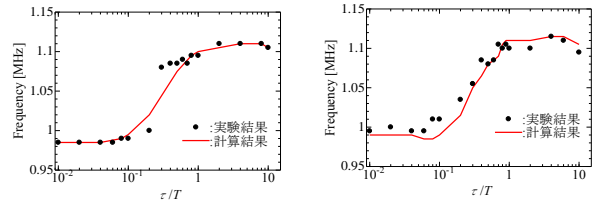
Fig.9 各周波数に対する振幅値(負荷:水)



(a) $\tau/T = 0.01$

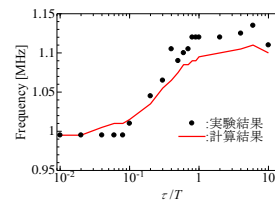
(b) $\tau/T = 10.0$

Fig.10 各周波数に対する振幅値(負荷:アルミ)



(a) 負荷:空気

(b) 負荷:水



(c) 負荷:アルミ

Fig.11 τ/T - ピーク周波数特性

をした後も振動を続け、それが時間と共に大きくなっていることがわかる。しかし、Fig.7(a), (b)において大きく振幅値が異なる。これより、圧電振動子の駆動には共振周波数の設定が重要な要素であることがわかる。Fig.8, 9, 10より、ピーク周波数付近が最も振幅値が大きく、

ピーク周波数を離れることで振幅値が減少していることがわかる。また、Fig.11 より、 τ/T の値が小さい場合、つまり電源インピーダンスが小さい場合は連続波法で測定した圧電振動子の共振周波数付近の値となっていることがわかる。しかし、 τ/T の値が大きい場合、つまり電源インピーダンスが大きい場合は連続波法で測定した反共振周波数付近の値となっていることがわかる。よって、圧電振動子を超音波センサとして用いる場合は、電源インピーダンスの影響を考慮して共振周波数付近で計測することが好ましいと考えられる。

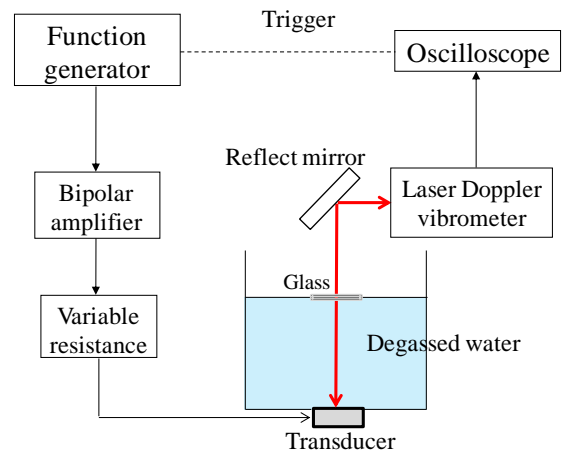


Fig.12 振動速度測定システム(負荷:水)

4. 圧電振動子表面の振動速度分布測定

4.1 測定システム(負荷:空気)

本研究の測定システムは Fig. 4と同様である。発振器(Agilent 33250A)から周波数 1.0 MHz、バースト正弦波 1 波の信号を発振する。バイポーラ増幅器(NF HSA4101)により増幅した信号を

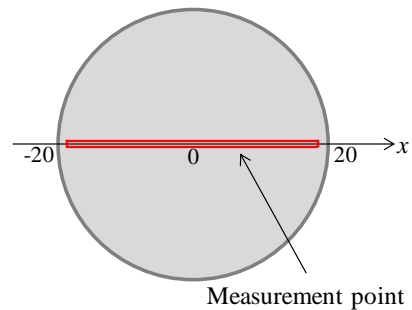


Fig.13 測定範囲

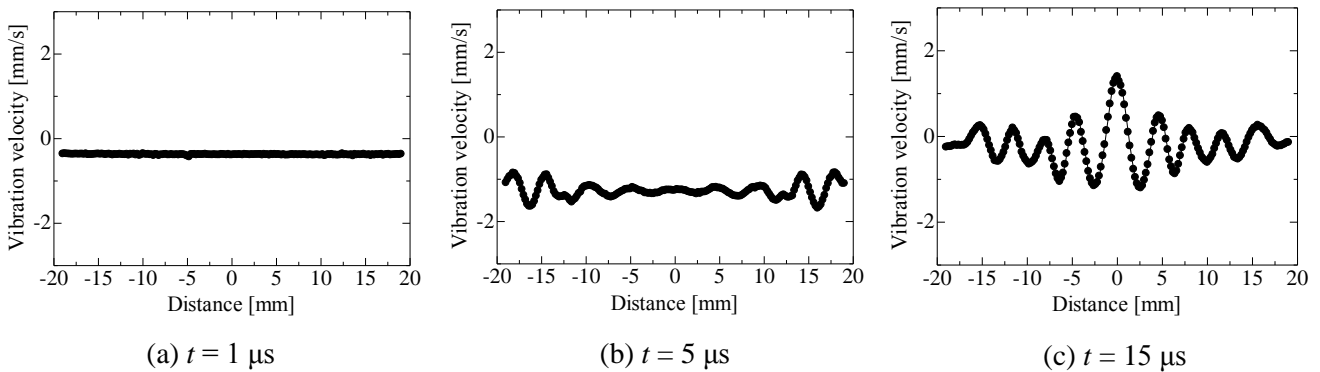


Fig.14 時間 t に対する振動速度分布($\tau/T = 0.01$, 負荷:空気)

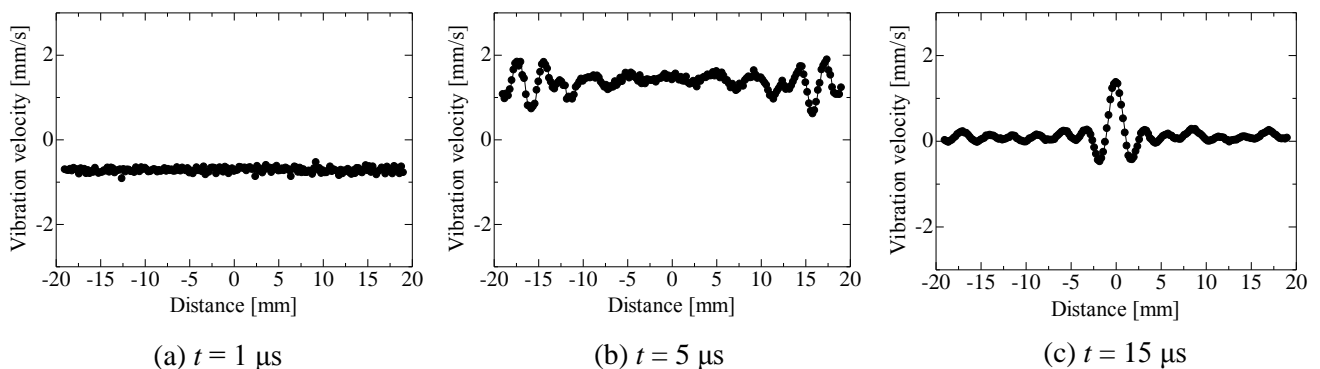


Fig.15 時間 t に対する振動速度分布($\tau/T = 10.0$, 負荷:空気)

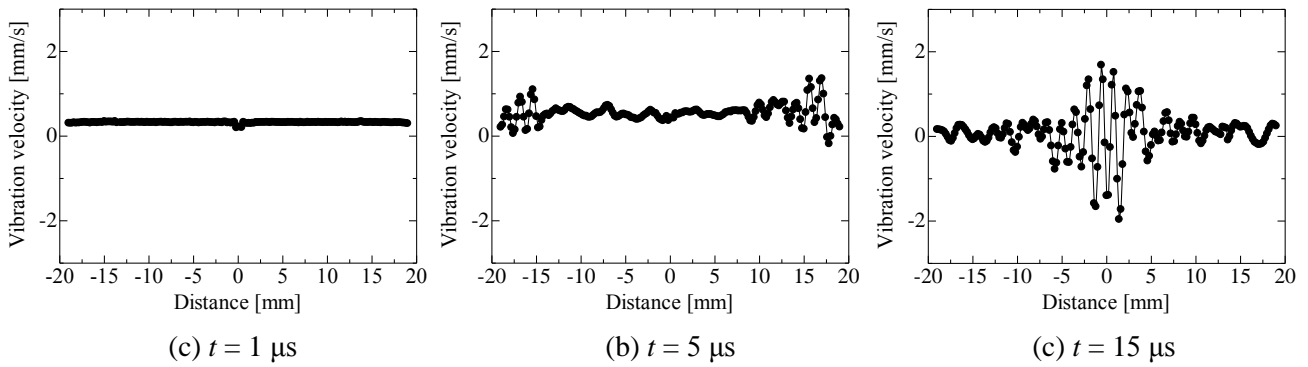


Fig.16 時間 t に対する振動速度分布($\tau/T = 0.01$, 負荷:水)

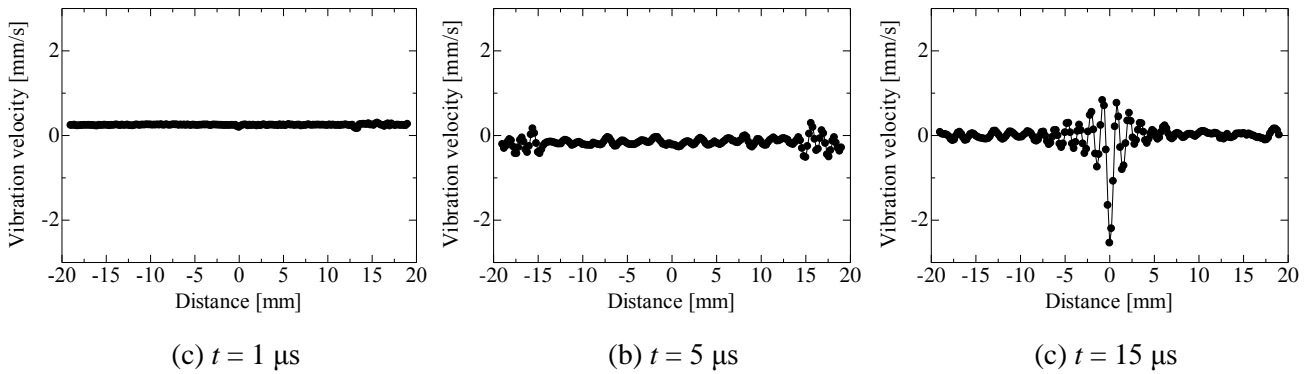


Fig.17 時間 t に対する振動速度分布($\tau/T = 10.0$, 負荷:水)

圧電振動子に印加する. τ/T を 0.01, 10.0 と設定した際の圧電振動子表面の振動速度をレーザードップラ振動計 (GRAPHTEC AT3700 L-012) で受波し, オシロスコープ (Agilent DSOX-3014A) に取り込み測定する.

4.2 測定システム(負荷:水)

本研究の測定システムを Fig.12 に示す. 発振器(Agilent 33250A)から周波数 1.0 MHz, バースト正弦波 1 波の信号を発振する. バイポーラ増幅器(NF HSA4101)により増幅した信号を圧電振動子に印加する. そして, 水を負荷とした際の圧電振動子表面の振動速度をレーザードップラ振動計(GRAPHTEC AT3700 L-012)で受波し, オシロスコープ(Agilent DSOX-3014A)に取り込み測定する. τ/T の設定は4.1と同様である.

4.3 測定範囲

測定範囲を Fig.13 に示す. 圧電振動子中心を $x = 0$ mm とする. レーザードップラ振動計を用いて $x = -19 \sim 19$ mm まで 0.2 mm ずつ走査し, 圧電振動子表面の振動速度波形を取得する.

4.4 測定結果と考察

Fig.14, 15 に空気を負荷とした際の $\tau/T = 0.01, 10.0$ における各時間に対する圧電振動子表面の振動速度分布の結果を示す. また, Fig.16, 17 に水を負荷とした際の $\tau/T = 0.01, 10.0$ における各時間に対する圧電振動子表面の振動速度分布の結果を示す. Fig.14, 15 共に $t = 1 \mu\text{s}$ において圧電振動子は全体的に平坦な振動を行っていることがわかる. $t = 5 \mu\text{s}$ では, 圧電振動子の中心付近はほぼ平坦な振動をしているが, 圧電振動子の端では振動による波が表れていることがわかる. また, $t = 15 \mu\text{s}$ において圧電振動子表面が大きく振動分布をもつことがわかる. これより, 圧電振動子は信号が印加され全体が振動した後, 端から中心方 $x=0$ 向に波打つように振動し, 全体が複雑に振動していくことが考えられる. しかし, Fig.14, 15 を比較すると, τ/T の変化によって各時間に対する圧電振動子表面の振動速度分布が異なっていくことがわかる. Fig.16, 17 より, 圧電振動子は, 水を負

荷とした際も同様に時間経過に伴い全体が複雑に振動を行っていることがわかる。これより、圧電振動子は電氣的な負荷及び機械的な負荷によって振動分布が異なると考えられる。

5. おわりに

本研究では電源インピーダンスの変化が圧電振動子の振動特性に与える影響に関して検討を行った。その結果、電源インピーダンスの変化に伴い圧電振動子の振動速度分布、共振周波数が変化することを示した。

今後は、電源インピーダンスにより送波側の共振周波数が変化した際の受波側に関する検討や、振動分布が異なる場合における音場の把握などが挙げられる。

《参考文献》

- [1] 丹羽 登：超音波計測，昭晃堂，pp.212-218(1982).
- [2] Morimasa NISHIHIRA, Matsuyuki KAIDO, Kazuhiko IMANO: "Experimental Determination of Piezoelectric Constants of Transversal Effects of Pb(Zr,Ti)O₃ Transducer Using Transient Response," *Jpn.J.Appl.Phys.*, Vol.41, No.5B, pp.3354-3355(2002)
- [3] 佐久間貞臣，上羽貞行，森栄司：日本音響学会誌，第39巻，第1号，pp.45-51(1983).
- [4] 河西千広，奥山大太郎，菊池喜充：電子情報通信学会誌，Vol.J56-A，pp.141-147(1973).