

# 円盤用ピックアップを用いた振動変位分布の測定

鈴木幹夫\*\*, 綿引 猛\*, 岡崎英次\*, 本多誠一\*

(1972年9月9日受理)

## Mesurement of the Displacement of vibration using a phonographic Pick-up

Mikio SUZUKI, Takeshi WATAHIKI, Eiji OKAZAKI and Seiichi HONDA

**Abstract:**— When the needle of the crystal pick-up for the phonograph is put on the vibrator, the out put voltage of the pick-up may be proportional to the displacement of the vibration. Using this method, the relative value of the distributed displacement of the resonating electromechanical transducer is measured.

In this paper, this method is experimentally discussed.

### 1. は し が き

電気音響変換器の試作, 解析等において共振時の振動変位分布を知る要求は非常に多い。ここでは磁歪振動子などによく用いられる簡単な形について, レコード再生用ピックアップの利用を試み, 等価複合線路的解析で求めた理論値と比較検討したところ実験の範囲では比較的良好な結果が得られた。この方法は一平面内の振動変位分布(または速度分布)の大略を簡単に知る方法としては良いと考えられるので以下に報告する。

### 2. 実験および結果

#### 1) 概 要

図1に示すように, 起電力を加えられ一平面内で振動する試料Mに, レコード再生用ピックアップ(以下 PU と略記する)をのせ, その出力を読む。このときの出力電圧が振動

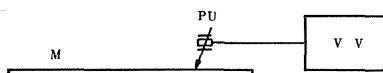


図 1

M: 試 料  
PU: ピックアップ  
VV: 真空管電圧計

\* 茨城大学工学部電子工学科

\*\* 茨城大学大学院工学研究科電子工学専攻

速度または変位に比例するならば、試料の各点での出力電圧から振動速度または変位の分布を推定できる。

## 2) 装置

本編での実験装置を図2に示す。図中の永久磁石は試料に偏倚磁化を与えるためのバリ

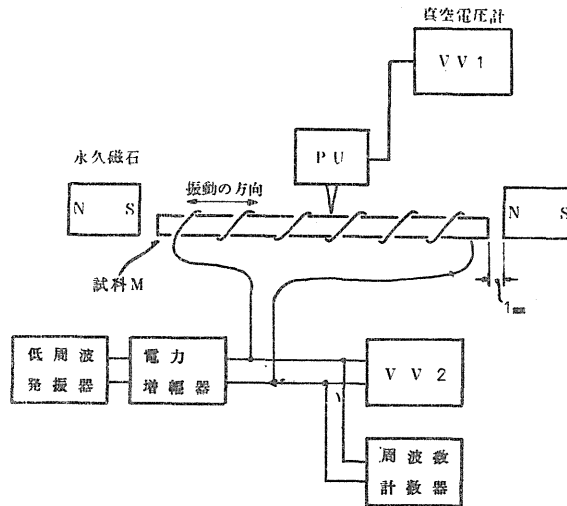


図 2

ウムフェライト製の永久磁石であり、この状態で試料の中央に約 100 cgs emu の磁化が与えられている。励振電力は、共振周波数にセットされている発振器の出力を電力増幅器で増幅し試料の励振コイルに与える。PU はアームと変位方向が直交するようにおかれ、その出力は真空管電圧計 VV1 により検出される。

実験は VV2 の指示 300mV 以下で行なった。(この電圧付近では増幅器の出力電圧と PU の出力電圧は略直線関係にある) なお PU はクリスタル形を用い図3に示すような構造に取り付けてある。またカートリッジ部は誘導妨害をさけるため真鍮の銅にてシールドしてある。

## 3) 試料

0.2mm 厚の純ニッケル板を図4、図5にそれぞれ示すような I 形または T 形に切断し、800°C 30分真空焼鈍したものを用いた。なおこの試料の振動変位は長さ方向 (XX' 方向) だけと仮定した。

## 4) I 形試料の実験結果および検討

図4に示す I 形試料の中心線 XX' 上の各点に PU をおいたときの PU の出力電圧を図6に示す。PU はクリスタル形であるので PU を試料にのせたとき振動モードの変化がなく針先の変位が振動変位と同じであれば出力電圧は変位に比例するはず

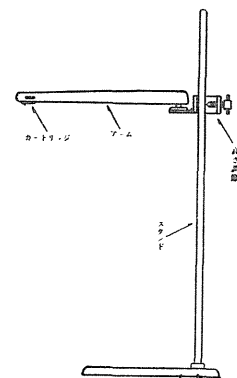


図 3

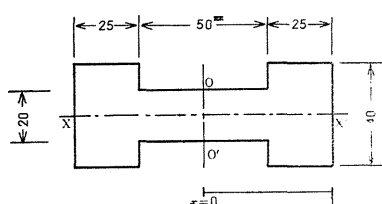


図 4

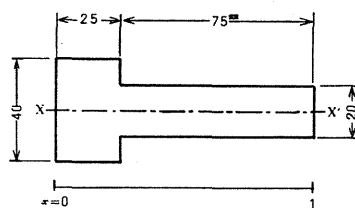


図 5

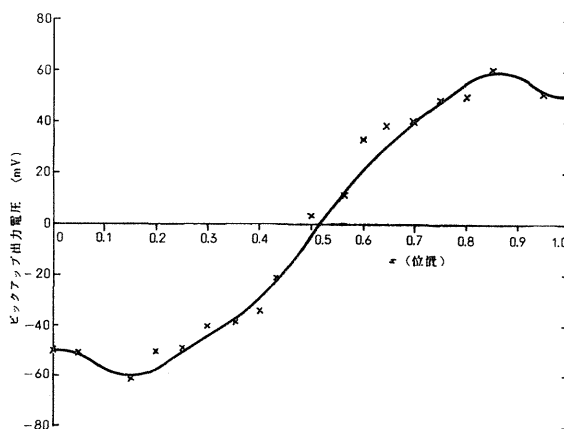


図 6

である。そこでまず PU をのせたときの振動モードの変化を調べるため、PU を振動子にのせたときとのせないときの巻線端子よりみた自由インピーダンスを測定してみる。PU をのせないときの自由インピーダンスを図 7 に、試料の端より 3mm の位置に PU をのせた

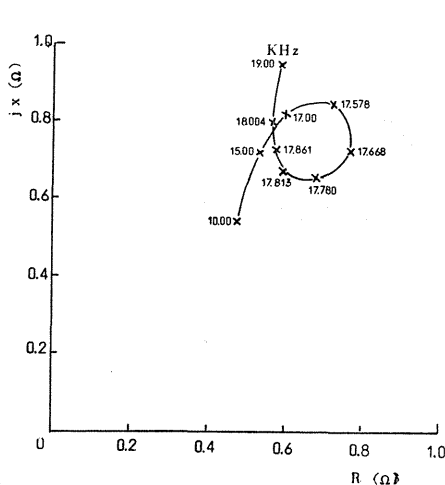


図 7

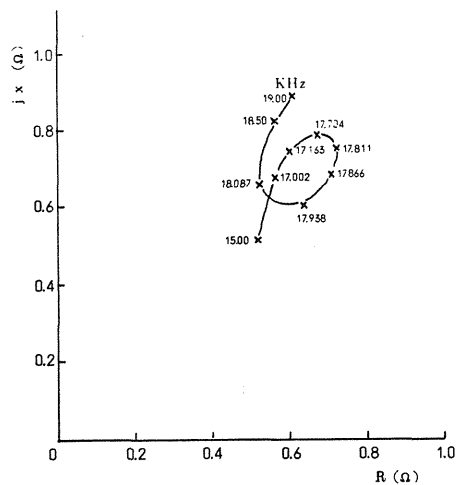


図 8

ときの自由インピーダンスを図8に示す。

これらより表1の如き量が読みとれる。  
いま試料の共振点付近の機械等価回路を、

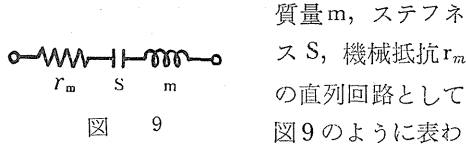


表 1

	PU をのせないとき	のせたとき
共振周波数 $f_0$	17.668 kHz	17.866 kHz
象限周波数 $f_1$	17.532	17.638
象限周波数 $f_2$	17.780	17.938
機 械 Q	71.2	59.6

し、この値を同表から求めてみよう。質量 m には試料の質量 5.4g を用いれば、  
PU をのせないときの  $r_m$ , S は、

$$r_m = 4.14 \times 10^3 \text{ (dyne/kine)}$$

$$S = 3.28 \times 10^{10} \text{ (dyne/cm)}$$

となる。

また、PU をのせたときは、共振点が高い方へずれていることと機械 Q が低下していることから試料のステフネスと機械抵抗が増加したと考えてみよう。この増加分は PU によるものであるから、この値を表1右欄より、機械抵抗の増分  $r_{m\ pu}$ , ステフネスの増分  $S_{pu}$  を求めれば、

$$r_{m\ pu} = 8.6 \times 10^2 \text{ (dyne/kine)}$$

$$S_{pu} = 8.14 \times 10^8 \text{ (dyne/cm)}$$

となるので、 $r_{m\ pu}$ ,  $S_{pu}$  は各々振動系の 20.7%, 25% を占めることになり PU をのせたためのモード変化は少なくないと考えられる。

ここで、もし変位分布が同じで、 $r_m$ , S の値が大きい試料が得られれば PU の影響は少なくなると考えられる。これを実現するために、同一試料を五枚重ねにし、アラルグイトで積層面を接着した。この試料での変位分布の測定結果を図10に示す。

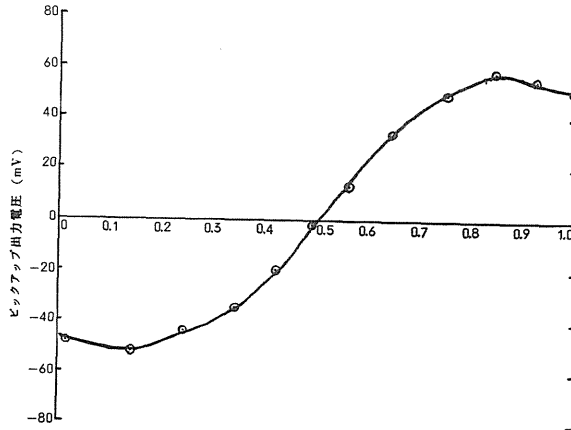


図 10

また, PU をのせたときと, のせないときの自由インピーダンス測定結果から前と同様の方法で PU の影響, 即ち抵抗の増分, ステフネスの増分を求めれば, 機械抵抗の増分は PU をのせないときの5.5%, ステフネスの増分は PU をのせないときの0.5%にすぎなかった。即ち, 1枚のときより, 五枚の方が PU の出力が実際の変位分布に近く指示していると考えられる。

### 3. 理論値との比較

以上のように, 五枚重ねのものは一枚のものに比べて  $f_0$  の変化も小さいので, 振動モードを変化させることは少ないと考えられる。しかし, 振動変位に PU の針先が追従することに対する懸念が残されているので, 計算により求めた変位分布と測定結果と比較してみる。

振動している I 型試料の中央 OO' は振動の節となるからインピーダンスは無限大と考えてよく従ってこの面を固定して右半分のみを考えればよい。

この試料の振動は, 密度と弾性率が BB' 面で非連続になっている複合棒と同様の振動をするものと考えることができる。BA 部分の密度, 弾性率が OB の部分の  $k$  倍である。これは, 終端が短絡されている図11のような複合電線路の電気現象と類推して考えることができる。

即ち, 伝播定数が等しく特性インピーダンスが異なる二つの伝送線路 OB, BA 接続し, O に存在する電源  $F_0$  によって生ずる線路の電流分布を機械振動の速度分布に対応させればよい。OB の部分の特性インピーダンス  $\dot{Z}_0$  は

$$\dot{Z}_0 = \sqrt{E \cdot \rho} S \dots\dots\dots(1)$$

BA の部分のそれは,

$$k\dot{Z}_0 = k\sqrt{E \cdot \rho} S \dots\dots\dots(2)$$

ただし,  $\rho$  は密度,  $E$  はヤング率である。

また, 伝播数  $r$  は,

$$r = j\omega \frac{1}{\sqrt{E/\rho}} \dots\dots\dots(3)$$

である。

OB 間の任意の点における力, 速度を  $F_1, V_1$ , BA 間のそれを  $F_2, V_2$  とおくと,

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ V_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh rx & -\dot{Z}_0 \sinh rx \\ -\frac{1}{\dot{Z}_0} \sinh rx & \cosh rx \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_0 \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

$(0 \leq x \leq l_1)$

$$\begin{pmatrix} F_2 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh r(x-l_1) & -\dot{Z}_0 \sinh r(x-l_1) \\ -\frac{1}{k\dot{Z}_0} \sinh r(x-l_1) & \cosh r(x-l_1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_B \\ B_B \end{pmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

$(l_1 \leq x \leq l_2)$

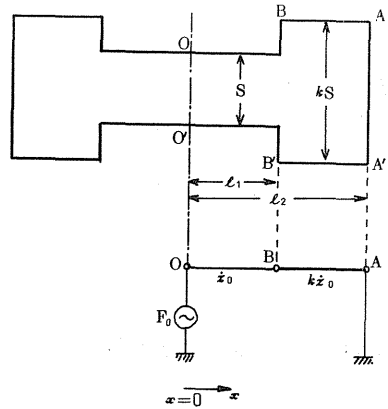


図 11

$F_B, V_B$  は、B 点における力、速度である。

点 B での力と速度の連続から、

$$F_1(x=l_1)=F_B, V_1(x=l_1)=V_B \dots\dots\dots(6)$$

かつ、今は自由振動を考えているから、A 点では力が零である。

ゆえに、

$$F_A=F_2(x=l_2)=0 \dots\dots\dots(7)$$

(6) 式より

$$F_B=F_0 \cosh rl_1, V_B=-\frac{F_0}{Z_0} \sinh rl_1 \dots\dots\dots(8)$$

また (7) 式より、共振条件は、

$$\tanh rl_1 \tanh r(l_2-l_1) + \frac{1}{k} = 0 \dots\dots\dots(9)$$

で与えられる。

共振時の速度分布は、

$$\begin{cases} V_1 = -\frac{F_0}{Z_0} \sinh rx \\ V_2 = -\frac{F_0}{Z_0} \cosh rl_1 \sinh r(x-l_1) - \frac{F_0}{Z_0} \sinh rl_1 \cosh r(x-l_1) \end{cases} \dots\dots\dots(10)$$

となる。

筆者らの実験した試料では、

$$k=2, l_1=\frac{l}{4}, l_2=\frac{l}{2} \dots\dots\dots(11)$$

である。これらの値を (9), (10) 式に代入して計算すると、

(9) 式より

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{4C}{l} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{C}{l} \times 3.92 \times 10^{-1} \dots\dots\dots(12)$$

(10) 式については、

$$\begin{cases} V_1 = -\frac{jF_0}{Z_0} \sin \beta x \\ V_2 = -\frac{jF_0}{k \cdot Z_0} \{ \cos \beta l_1 \sin \beta(x-l_1) + k \sin \beta l_1 \cos \beta(x-l_1) \} \end{cases} \dots\dots\dots(13)$$

となる。ただし  $\beta=2\pi f_0/C$  である。

また、 $V_1, V_2$  に対応する変位分布を  $\xi_1, \xi_2$  とおけば、変位の時間微分が速度であるから

$$\xi_1 = \frac{V_1}{j\omega}, \xi_2 = \frac{V_2}{j\omega} \dots\dots\dots(14)$$

である。従って、変位分布は、単一周波数に対しては速度分布と同形となる。図12に (21) 式で計算した変位分布を最大値を 1 として示す。また同図には、実験結果も最大値を 1 として示しておいた。

同図にみられるように測定値は理論値にほぼ一致した結果が得られている。

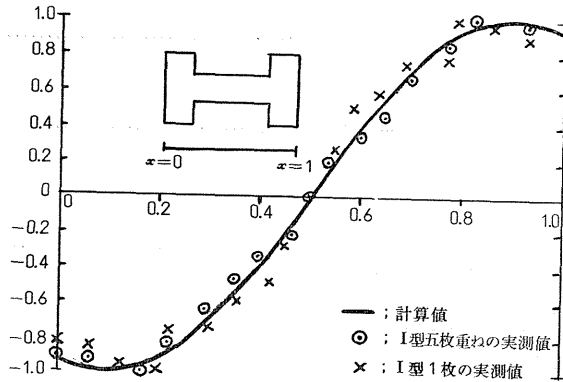


図 12

4. T 形試料による実験

前述のように五枚重ね I 形試料の場合, 理論値と実測値がほぼ一致する結果を得たので, 非対称形の例として, 図 5 の T 形試料を五枚重ねて PU により変位分布を測定した。結果を最大値を 1 として示せば図 14 のプロットのようになる。

次に, 前述と同様伝送線路類推により理論値を求めてみる。T 形の場合は, 非対称であるから, 振動の節は中央にあるとはいえない。

そこで, 伝送回路を図 13 のごとくに起振力を加える点 B の位置を不定にして解析していく。

AB 間の力, 速度分布を  $F_1, V_1$ , BC 間のそれを  $F_2, V_2$ , CD 間で  $F_3, V_3$  とおくと,

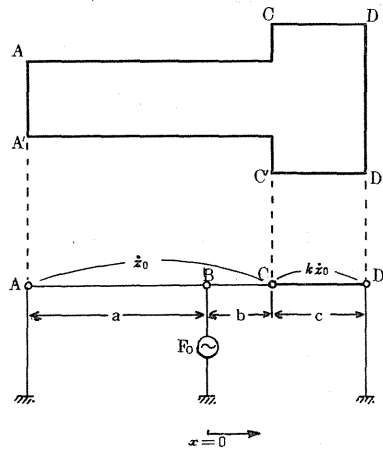


図 13

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ V_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh rx & -\dot{Z}_0 \sinh rx \\ -\frac{1}{\dot{Z}_0} \sinh rx & \cosh rx \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (-a \leq x \leq 0) \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\begin{pmatrix} F_2 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh rx & -\dot{Z}_0 \sinh rx \\ -\frac{1}{\dot{Z}_0} \sinh rx & \cosh rx \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (0 \leq x \leq b) \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$\begin{pmatrix} F_3 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh r(x-b) & -k\dot{Z}_0 \sinh r(x-b) \\ -\frac{1}{k\dot{Z}_0} \sinh r(x-b) & \cosh r(x-b) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_C \\ V_C \end{pmatrix} \quad (b \leq x \leq c) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{ただし } a+b=l_1, a+c=l_1+l_2=l \quad \dots\dots\dots(18)$$

境界条件を考えると,

$$F_A = F_1(x=-a) = 0, F_D = F_3(x=C) = 0 \quad \dots\dots\dots(19)$$

また, C 点での力, 速度の連続から

$$F_c = F_2(x=b), V_c = V_2(x=b) \dots\dots\dots(20)$$

これらより

$$F_c = F_0 \cosh rb, V_c = -\frac{F_0}{Z_0} \sinh rb \dots\dots\dots(21)$$

共振条件は

$$\begin{cases} \cosh ra = 0 \\ \frac{1}{k} = \tan hr (c-b) \coth r (a+b) \end{cases} \dots\dots\dots(22)$$

なる  $r, a$  に関する連立方程式となる。

また、共振時の速度分布は、

$$V = \begin{cases} -\frac{F_0}{Z_0} \sinh rx & (-a \leq x \leq b) \\ -\frac{F_0}{Z_0} \left\{ \cosh rb \sinh r(x-b) - \sinh rb \cosh r(x-b) \right\} & (b \leq x \leq c) \end{cases} \dots\dots\dots(23)$$

筆者らが実験した試料においては、

$$k=2, l_1 = \frac{3}{4}l, l_2 = \frac{1}{4}l \dots\dots\dots(24)$$

であるから、これらの値を (22), (23) 式に代入して、

$$f_0 = \frac{c}{l} \times \frac{4}{2\pi} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{5}{7}} = \frac{c}{l} \times 3.95 \times 10^{-1} (c/s) \dots\dots\dots(25)$$

となる。

共振状態では (23) 式は変位分布と同形になるので最大値 1 として図 5 の (23) 式による変位分布の計算結果を示せば図 14 の実線のようになる。

5. む す び

以上 PU を用いて一平面内変位分布を実測した結果、五枚重ね試料の場合は PU を試料上にのせたために生ずるモード変化もあまり大きくなく、また、針先の追従性もよく、略理論値の実測値を得ることができた。

この測定法は、測定操作は非常に簡単であるが、電気的な誘導誤差をさけるために PU のシールドには充分注意する必要がある。

また変位分布は一般に相対値が必要な場合が多いので、本研究では絶対値は求めていない。しかし本方式に適当な較正を加えることにより絶対値を求めることも困難ではないと考える。

現在筆者らは、この方法により複雑な外形を有する振動子の共振周波数の理論解析に応用することを考えている。

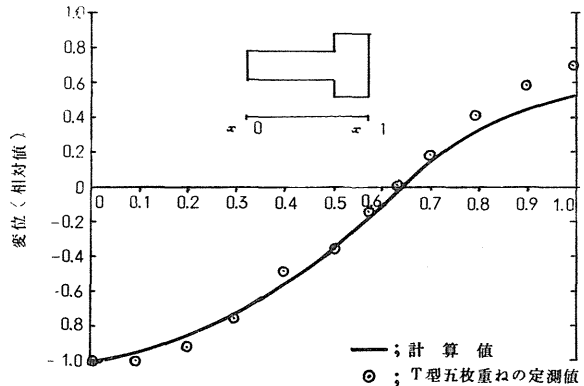


図 14