

過渡応答法を用いた圧電振動子の特性測定実験
Measurements of characteristics of piezoelectric transducer
using transient response

○ 海道松之[†] 西平守正[†] 今野和彦[†]

Matsuyuki Kaido, Morimasa Nishihira, Kazuhiko Imano

[†] 秋田大学

Akita University

キーワード：過渡応答(transient response), 圧電振動子(piezoelectric transducer)
共振周波数(resonance frequency), 反共振周波数(antiresonance frequency)
圧電定数(piezoelectric constant)

連絡先：〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学工学資源学部電気電子工学科
今野和彦, Tel.: (018)889-2490, Fax: (018)837-0406, E-mail: imano@ipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

圧電振動子を超音波センサとして用いる場合, センサとしての使用に適した圧電振動子の材料開発が必要となる. その材料開発には圧電振動子の特性を正確に測定しなければならない.

圧電振動子の特性を示す諸定数は, 圧電振動子の共振周波数 f_r , 反共振周波数 f_a , 自由容量 C^F , 質量 m , 寸法の測定値を用いて算出することができる¹⁾. これらの諸定数を算出するための測定方法は, 使用しやすい測定器が数多く開発され商品化されている連続波法が多く用いられている¹⁾. その連続波法は, 圧電振動子を正弦波で駆動し周波数掃引することでインピーダンスおよび位相特性から共

振周波数と反共振周波数を求めることができる測定方法である.

インピーダンスメータを用いる連続波法は圧電振動子の自由容量の測定に別の装置を用いる必要があるため, 連続波法では共振周波数, 反共振周波数, 自由容量を複数の装置が必要となり測定に時間がかかる.

そこで, 特性を知る上で必要な値を求める測定装置の簡便化が必要とされている.

本研究では, パルス電圧と同じ過渡的振動のステップ電圧を使用している過渡応答法で, 圧電振動子の共振周波数, 反共振周波数と自由容量の測定が単一装置で測定可能であるか検討をおこなった.

2. 圧電振動子の過渡応答特性

2.1 圧電振動子の過渡応答特性の解析

圧電振動子の過渡応答解析の方法として、図 2-1 に圧電振動子への入力電圧としてステップ電圧を用いた場合の過渡応答解析の原理図を示す。

一般的に入力電圧関数は時間領域で観測され、圧電振動子のアドミタンスは周波数領域で観測されている。そこで過渡応答電流を得るために以下に示すような解析手順が必要である。

周波数領域での入力電圧関数 $V(f)$ は、時間領域での入力電圧関数 $v(t)$ をフーリエ変換することにより得られる。

$$V(f) = F \{ v(t) \} \quad (2-1)$$

周波数領域の出力電流関数 $I(f)$ は、圧電振動子の周波数領域のアドミタンス $Y(f)$ と周波数領域の入力電圧関数 $V(f)$ との積をとることと求められる。

$$I(f) = V(f) \cdot Y(f) \quad (2-2)$$

圧電振動子の固有周波数を示す周波数スペクトル $I(f)$ は、(2-2) 式を用いて $V(f)$ と $Y(f)$ より算出できる。

2.2 圧電振動子のアドミタンス $Y(f)$ の導出

圧電振動子の等価回路は、Mason の等価回路(横効果)を用いることで図 2-2 のように表される。

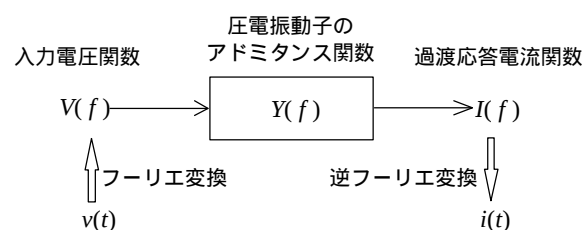


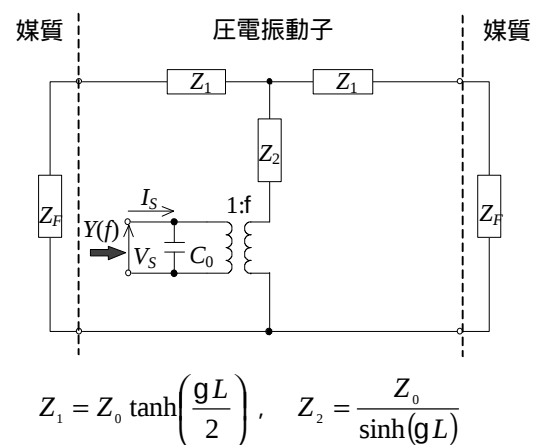
図 2-1 圧電振動子の過渡応答解析原理図

図 2-2 にあるトランスは、圧電振動子の電気-音響変換を表している。トランスの左側の部分を含む回路は、圧電振動子の電気的な量を表しており、トランスの右側の部分を含む回路は、圧電振動子の機械的な量を表している。圧電振動子の周波数領域のアドミタンス $Y(f)$ は圧電振動子の電気端子から圧電振動子側から見た電気インピーダンスの逆数になる。

$$Y(f) = \frac{j2\pi f C_0 (Z_1 + 2Z_2 + Z_F) + 2f^{-2}}{Z_1 + 2Z_2 + Z_F} \quad (2-3)$$

図 2-2 においてトランスの左側に電源を挿入して考えると電源インピーダンス $R_S (= V_S / I_S)$ を考慮する必要がある。周波数領域の過渡応答電流 $I(f)$ は、(2-3) 式を用いて次式のように考えることができる。

$$I(f) = \frac{V(f)}{R_S + \frac{1}{Y(f)}} \quad (2-4)$$



Z_F : 振動子の片面に接している媒質の機械的インピーダンス $[Ns/m^3]$
 Z_0 : 振動子の音響特性インピーダンス $[Ns/m^3]$
 C_0 : 振動子の制動容量 $[F]$
 R_S : 電源インピーダンス $R_S = V_S / I_S$
 f : 電気機械変成比 $[N/V]$
 L : 圧電振動子の縦方向の長さ $[m]$
 g : 伝搬定数 $g = a + jb$ (a : 減衰定数 $[Np/m]$ b : 位相定数 $[rad/m]$)
 V_S : 入力電圧 $[V]$
 I_S : 入力電流 $[A]$

図 2-2 Mason の等価回路(横効果)

3 過渡応答法を用いた振動子の特性測定

3-1 過渡応答法を用いた測定原理

過渡応答法の測定原理を図 3-1 に示す．時間領域の過渡応答電流 $i(t)$ は，時間領域の入力電圧 $v(t)$ と圧電振動子のアドミタンス $y(t)$ とのたたみこみ積分により求めることができる．過渡応答電流 $i(t)$ は，時間領域であるため圧電振動子の周波数特性を直接観測することができない．したがって，周波数領域の過渡応答電流 $I(f)$ を求める必要がある．その方法として，時間領域の過渡応答電流 $i(t)$ をフーリエ変換することにより，周波数領域の過渡応答電流 $I(f)$ を求めることができる．

$$I(f) = F \{ i(t) \} \quad (3-1)$$

3.2 圧電振動子の電氣的等価回路

圧電振動子の外形を図 3-2 に示す．圧電振動子に電圧を印加すると z 軸方向に電界が生じ，その電界方向に対して垂直な x 軸方向に圧電振動子は振動する．矩形板圧電振動子の場合，その振動は中心部分がもっとも振動変

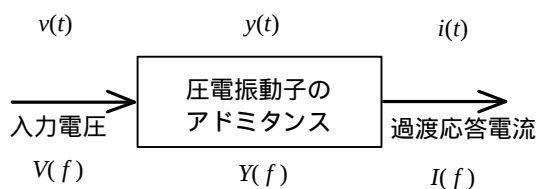


図 3-1 過渡応答法の測定原理図

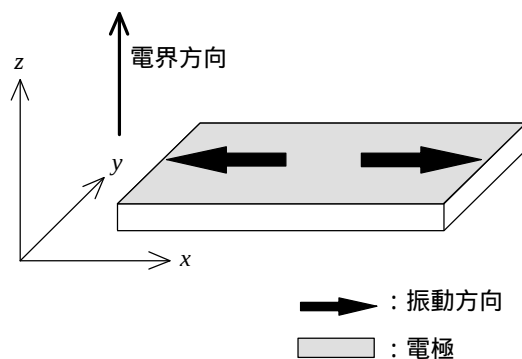


図 3-2 圧電振動子の外形

位が小さく，圧電板の端の部分のがもっとも振動変位が大きい．このように電界に対して垂直に振動する圧電振動子を横効果圧電振動子という．

共振周波数付近における圧電振動子の等価回路は図 3-3 のように表すことができる．

圧電振動子の振動を表している機械的振動成分は RLC 直列回路で表すことができ，圧電振動子の誘電体としての容量を表している電氣的成分は RLC 直列回路に並列に接続されている制動容量 C_0 で表すことができる．

図 3-3 の等価回路より圧電振動子の機械的振動成分は動アドミタンス $Y_m(f)$ として表され，圧電振動子の電氣的成分は制動アドミタンス $Y_0(f)$ として表される．よって，圧電振動子の全アドミタンス $Y(f)$ は，動アドミタンス $Y_m(f)$ と制動アドミタンス $Y_0(f)$ の和となる．

$$Y(f) = Y_m(f) + Y_0(f) \quad (3-2)$$

圧電振動子の過渡応答電流は，機械的振動成分であるため動アドミタンスに流れる動電流成分である．よって，(3-2)式から動アドミタンスに流れる動電流成分 $I_m(f)$ は，圧電振動子のアドミタンスに流れる全電流 $I(f)$ と圧電振動子の制動容量に流れる制動電流成分の差から求めることができ，次式のように表すことができる．

$$I_m(f) = I(f) - I_0(f) \quad (3-3)$$

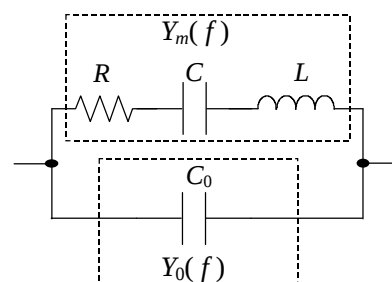


図 3-3 圧電振動子の等価回路(共振時)

3.3 過渡応答法を用いた過渡応答電流の測定

3-3-1 測定回路

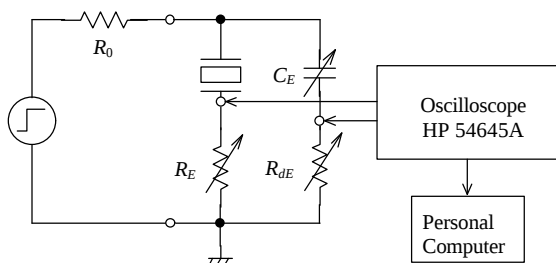
圧電振動子の過渡応答電流の測定回路を図 3-4 に示す。

圧電振動子の過渡応答波形の観測には，オシロスコープ，パルス電圧発生器，圧電振動子，可変抵抗 R_E と $R_{dE}(=R_E)$ []，可変キャパシタンス C_E [F] を用いる。ここで，パルス電圧発生器から発生するパルス電圧の 1 周期が 64 ms であり，立ち上がり時間は 8 ns，電圧振幅 3.6 V である。本実験では，このパルス電圧発生器の半周期だけを観測に用いることで図 3-4 のステップ電圧発生器として考える。また，電源内部抵抗 $R_0 = 3$ 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。

$$R_S = R_0 + R_E = 3 + R_E \quad (3-4)$$

ここで，図 3-4 より可変抵抗 R_E を変化させることで電源インピーダンス R_S は変化させることができる。この電源インピーダンス R_S と圧電振動子の制動容量 C_0 [F] の積から図 3-4 の測定回路の時定数 t は，次式のように決まる。

$$t = C_0 R_S \quad (3-5)$$



R_E : 可変抵抗(= R_{dE}) []

R_0 : 電源内部抵抗 []

C_E : 可変容量 [F]

図 3-4 過渡応答電流の測定回路

また，圧電振動子内での音波の伝播時間 T [s] は，次式で表すことができる。

$$T = \frac{l_1}{v} = \frac{l_1}{2f_r l_1} = \frac{1}{2f_r} \quad (3-6)$$

ここで， v : 圧電振動子の音速[m/s]， f_r : 圧電振動子の共振周波数[Hz]， l_1 : 圧電振動子の長さ[m]である。この(3-5)式の時定数は，圧電振動子により値が異なるため(3-5)式と(3-6)式の比をとった t/T で規格化し，過渡応答波形の観測で圧電振動子の電氣的条件を表すパラメータとして用いる。

また，図 3-4 の測定回路において圧電振動子が共振状態にあるとき，圧電振動子の等価回路は，図 3-3 で表すことができる。

3-3-2 測定方法

図 3-4 に示す過渡応答法の測定回路において，はじめに圧電振動子をステップ電圧で駆動する。

つぎに，測定原理で述べた理由より圧電振動子に流れる制動電流成分を差し引く。

その方法として，図 3-4 の測定回路の圧電振動子と並列になるように可変容量 C_E と可変抵抗 R_{dE} の直列回路を図 3-4 のように接続する。圧電振動子に流れる全電流をオシロスコープ ch.1 で観測し，圧電振動子の制動容量に流れる制動電流と等しくなるように設定した可変容量 C_E をオシロスコープ ch.2 で観測し，その ch.1 と ch.2 の差により，圧電振動子の動電流成分だけの過渡応答波形をオシロスコープで得ることができる。

そのオシロスコープの過渡応答波形を PC によって取り込み，高速フーリエ変換(FFT)をすることで過渡応答電流波形の周波数スペクトルが得られる。

また，電氣的条件を表すパラメータの t/T を変えて圧電振動子の過渡応答電流を観測する。

3-3-3 測定結果

前節で述べた方法で求めた圧電振動子の動電流成分の過渡応答電流波形は、図 3-5 のようになる。

その図 3-5 の過渡応答電流波形を高速フーリエ変換することで得られた過渡応答電流の周波数スペクトルを図 3-6 に示す。

ここで、2 本あるピークのうち大きい方が矩形板圧電振動子の基本共振モードである長さ振動方向の基本共振を示すピークで、小さい方がその 3 次共振を示すピークである。

この周波数スペクトルのピークは、 t/T を変化させることで周波数シフトする現象が見られた。この周波数スペクトルのピークが t/T により周波数シフトしている様子を図 3-7 に示す。

以上のようにして t/T を 0.01 から 15 まで変化させて求めた t/T に対するピーク周波数

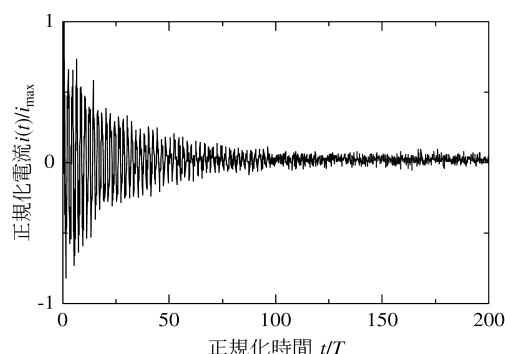


図 3-5 過渡応答電流波形

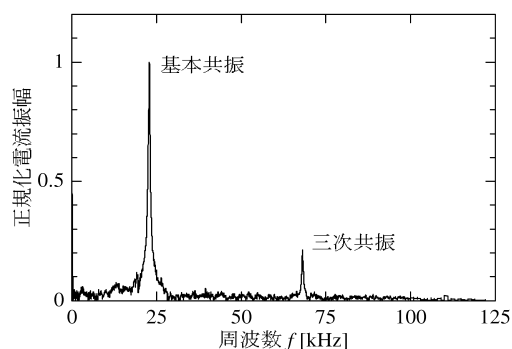


図 3-6 過渡応答電流の周波数スペクトル

特性の測定結果を図 3-8 に示す。実験において、ピーク周波数の測定値が測定ごとに数 Hz 程度異なっていたため、測定値のばらつきは 0.01 ~ 0.02% 程度あった。この図から、圧電振動子のピーク周波数は t/T の増加にしたがい高い方にシフトしている様子がわかる。また、 t/T に対する正規化容量 C_E/C_0 特性の測定結果を図 3-9 に示す。

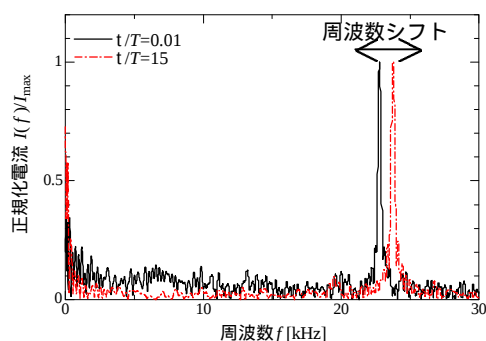


図 3-7 基本共振付近の周波数スペクトル

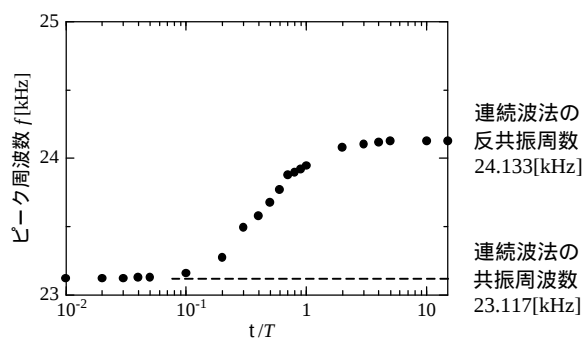


図 3-8 t/T - ピーク周波数特性

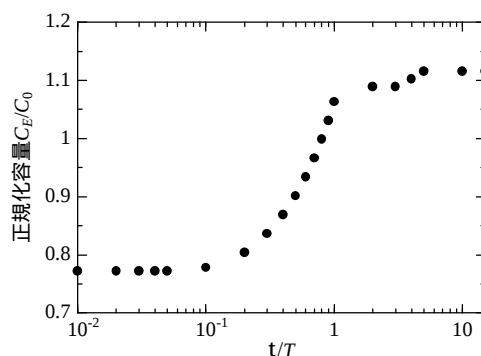


図 3-9 t/T - 正規化容量特性

図 3-8 の測定結果より t/T が 0.05 以下の場合、つまり電源インピーダンスが小さく定電圧駆動の状態と見なせる条件においてピーク周波数は、23.120 kHz と連続波法で測定した共振周波数に近い値になった。一方、 t/T が 5 以上の場合、つまり電源インピーダンスが大きく定電流駆動の状態と見なせる条件においてピーク周波数は、24.127 kHz と連続波法で測定した反共振周波数に近い値になった。

図 3-9 よりピーク周波数の場合と同様に、可変容量 C_E も t/T の条件によりある値に収束する特性を持つことがわかる。 t/T の値が 5 以上である定電流駆動と見なせる条件では可変容量 C_E が自由容量 C^F の値になっていると考えることができる²⁾³⁾。

3-4 矩形板圧電振動子の諸定数算出

矩形板圧電振動子の諸定数は、まず圧電振動子の共振周波数 f_r [Hz]、反共振周波数 f_a [Hz]、寸法と質量 m [kg] (密度 r [kg/m³])、自由容量 C^F [F]、を測定する。次に、これらの値を用いて長さ方向振動の電気機械結合係数 k_{31} 、制動容量 C_0 [F]、音速 v [m/s]、応力一定時の誘電率 e_{33}^T [F/m]、歪み一定時の誘電率 e_{33}^S [F/m]、電界一定時のコンプライアンス s_{11}^E [m²/N]、電束密度一定時のコンプライアンス s_{11}^D [m²/N]、圧電 d_{31} 定数 [m/V]、圧電 g_{31} 定数 [Vm/N]、圧電 e_{31} 定数 [C/m²]、圧電 h_{31} 定数 [V/m] は、以下の式のようにして求めることができる¹⁾。

$$k_{31} = \sqrt{\frac{\frac{p}{2} \left(1 + \frac{f_a - f_r}{f_r} \right) \tan \left(\frac{p}{2} \cdot \frac{f_a - f_r}{f_r} \right)}{1 + \frac{p}{2} \left(1 + \frac{f_a - f_r}{f_r} \right) \tan \left(\frac{p}{2} \cdot \frac{f_a - f_r}{f_r} \right)}} \quad (3-7)$$

$$C_0 = C^F (1 - k_{31}^2) \quad (3-8)$$

$$v = 2f_r l_1 \quad (3-9)$$

$$e_{33}^T = \frac{C^F t}{l_1 l_2} \quad (3-10)$$

$$e_{33}^S = e_{33}^T (1 - k_{31}^2) \quad (3-11)$$

$$s_{11}^E = \frac{1}{r v^2} \quad (3-12)$$

$$s_{11}^D = s_{11}^E (1 - k_{31}^2) \quad (3-13)$$

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{e_{33}^T s_{11}^E} \quad (3-14)$$

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{e_{33}^T} \quad (3-15)$$

$$e_{31} = \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \quad (3-16)$$

$$h_{31} = \frac{e_{31}}{e_{33}^S} \quad (3-17)$$

(3-7)式から(3-17)式を用いて、連続波法と過渡応答法のそれぞれの測定値から算出した圧電振動子の諸定数を表 1 に示す。

表 1 圧電振動子の諸定数

	過渡応答法	連続波法
共振周波数 f_r [Hz]	23.120 $\diamond$ 10 ³	23.117 $\diamond$ 10 ³
反共振周波数 f_a [Hz]	24.127 $\diamond$ 10 ³	24.133 $\diamond$ 10 ³
電気機械結合係数 k_{31}	0.318	0.319
自由容量 C^F [F]	8577 $\diamond$ 10 ⁻¹²	8577 $\diamond$ 10 ⁻¹²
圧電 d 定数 d_{31} [m/V]	1.25 $\diamond$ 10 ⁻¹⁰	1.25 $\diamond$ 10 ⁻¹⁰
圧電 g 定数 g_{31} [Vm/N]	10.1 $\diamond$ 10 ⁻³	10.1 $\diamond$ 10 ⁻³
圧電 e 定数 e_{31} [C/m ²]	10.03	10.07
圧電 h 定数 h_{31} [V/m]	9.02 $\diamond$ 10 ⁸	9.06 $\diamond$ 10 ⁸

4.検討

過渡応答電流波形の周波数スペクトルに見られるピークは、 t/T が大きくなると現れるピークの周波数が図 3-7 のように高い方へシフトする現象が見られた。その t/T に対するピーク周波数の変化は t/T が 0.05 以下の場合あるいは 5 以上の場合、ピーク周波数がそれぞれある値に収束することがわかった。

t/T が 0.05 以下の場合、つまり電源インピーダンスが小さく定電圧駆動の状態と見なせ

る条件においてピーク周波数は，連続波法で測定した共振周波数にほぼ一致した値になった． t/T が 5 以上の場合，つまり電源インピーダンスが大きく定電流駆動の状態と見なせる条件においてピーク周波数は，連続波法で測定した反共振周波数にほぼ一致した値になった．よって，過渡応答法での電気機械結合係数の算出⁴⁾が共振周波数と反共振周波数を用いて算出することができた．

圧電振動子の諸定数の結果を表 1 に示した．過渡応答法と連続波法の電気機械結合係数を比較すると，連続波法で求めた電気機械結合係数より 1% 以下程度小さく算出されているものの，圧電振動子の諸定数はよく一致しているといえる．この小さくなる一因として，過渡応答法ではステップ電圧源を用いて広帯域の周波数で圧電振動子を振動させていることから，長さ方向振動以外の幅方向，厚み方向のモード振動が生じた分電気機械結合係数が小さく求められたと思われる．

5. おわりに

過渡応答法において t/T の値を適切に選ぶことで連続波法と同等な共振，反共振周波数を求められることが示された．

t/T の値が 1 付近で圧電振動子の制動容量の値になり， t/T の値が 5 以上である定電流駆動と見なせる条件では可変容量 C_E が自由容量 C^F の値になっていることがわかった．

以上より本研究で得られた結果によって，過渡応答法を用いた圧電振動子の共振周波数，反共振周波数および自由容量の測定の可能性を示すことができたと考えられる．

参考文献

- 1) 圧電セラミックス技術委員会：圧電セラミックス振動子の電氣的試験方法 EMAS-6100，8/11，54/57，日本電子材料工業会，(1993)

- 2) 広瀬精二，高橋貞行：圧電振動子のハイパワー特性測定法とその圧電トランス設計への応用，電子情報通信学会論文誌，Vol. 80-A No.10，1621/1636(1997)
- 3) 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会 編：弾性波素子技術ハンドブック，66/82，オーム社(1991)
- 4) 今野和彦，奥山大太郎：過渡応答を用いた圧電振動子の電気機械結合係数 k_{31} の一測定法，電子情報通信学会論文誌，Vol. J74-A No.5，797/800(1991)