

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：53101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06805

研究課題名(和文) 高振動レベル下における圧電セラミックスの縦効果および反共振特性の測定

研究課題名(英文) Measurement of the longitudinal effect and antiresonance characteristics of piezoelectric ceramics under large vibration levels

研究代表者

梅田 幹雄 (Umeda, Mikio)

長岡工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：00342478

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：まず、電氣的共振下における圧電振動子の振動レベル特性測定をいくつかの手法で試みたが良好な結果は得られなかった。次に、電氣的共振下における圧電縦効果振動子の振動レベルを測定し圧電横効果振動子の振動レベル特性と比較した。振動レベルを振動速度で表示した場合、縦効果振動子の諸特性の変化率や高振動レベルにおける機械的損失は横効果振動子との比較で小さいことが明らかとなった。さらに、高振動レベル下での特性を簡易的に測定算出する方法について提案し検討した。本来の電氣的過渡応答法による結果と比較したところ、いくつかの定数の振動レベル特性の傾向はほぼ一致したものとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電氣的過渡応答法により電氣的共振下での圧電縦効果振動子の振動レベル特性の測定が可能であることが確認されたことで、高振動レベルでも安定した特性を持つ圧電縦効果素子の開発が進むと考えられる。また、電氣的共振下の高い振動速度領域では圧電横効果振動子に比べ圧電縦効果振動子のほうが特性変化や損失面で優位であることが確認されたことで、高振動レベル下での圧電縦効果振動子の応用が広がると予想される。一方、高価な振動速度計を整備しなくともいくつかの定数の振動レベル特性の傾向を簡易的に測定することが可能であることが確認されたことで、高振動レベルに適した圧電材料の開発がより進むと考えられる。

研究成果の概要(英文)：First, the several methods to measure the vibration level characteristics of the piezoelectric transducer under electrical antiresonance were tried, but good results were not obtained. Next, the vibration level characteristics of the piezoelectric longitudinal effect transducer under electrical resonance were measured and discussed in comparison with the piezoelectric transverse effect transducer. When the vibration velocity was used as parameter for the vibration level, the changes in various characteristics of the longitudinal effect transducer and the mechanical loss at the large vibration level were smaller than them of the transverse effect transducer.

Moreover, a simple method for measuring and calculating the characteristics under large vibration levels were proposed and examined. When compared with the results by the original electrical transient response method, the tendencies of the vibration level characteristics of some constants were nearly the same.

研究分野：圧電デバイス

キーワード：電氣的過渡応答法 圧電縦効果 高振動レベル 簡易測定

1. 研究開始当初の背景

圧電応用分野の一つには超音波の特徴である強いパワー密度を利用した強力超音波トランスデューサ、超音波モータ、圧電アクチュエータ、圧電トランスなどのハイパワー圧電・超音波デバイスがある。これらのデバイスでは高振動レベルの機械的共振を利用してデバイス機能が発揮される。従ってここでは高振動レベルまで特性の安定したハイパワー用圧電材料が使用されるが、ハイパワー用圧電材料に関する研究は未だ十分に行われてきたとはいえない。

このような背景のもと、本研究室では測定中に材料温度の上昇が無視できる程度に小さく、かつ1秒以下の極めて短時間内に振動レベル特性の測定評価が可能な電氣的過渡応答法の開発に成功した。そしてこの測定法は日本工業規格 JIS R 1699-2 :2016 「ファインセラミックス-高負荷環境下での圧電材料の特性- 第2部：電氣的過渡応答法による高振動レベル下での測定法」に平成28年7月30日制定されたところである。一方、上記規格は圧電横効果に関する測定法であり、他の圧電効果の測定や圧電デバイス自体の測定は除外されている状況にある。また、その測定は共振点近傍の特性に限定されたものとなっている。

2. 研究の目的

このように電氣的過渡応答法は電氣的共振下における圧電横効果振動子の振動レベル特性測定に特化したものである。この電氣的過渡応答法を発展させ、より多くの条件に対応する測定法にすること及びこの測定法をより普及させることを目的とする。具体的には以下の項目を掲げる。

- (1) 反共振下での振動レベル特性を測定できるようにして、共振下での特性と比較し、その傾向を明らかにする。
- (2) 圧電縦効果振動子の振動レベルを測定できるようにして、圧電横効果振動子における振動レベル特性と比較し、その傾向を明らかにする。
- (3) 新しい簡易的測定手法を提案し日本工業規格等に展開できるか検討する。

3. 研究の方法

まず、本研究室で考案し日本工業規格 JIS R 1699-2 に採用された電氣的過渡応答法に基づく測定方法について概説する。図1に実験装置の概略図を示す。長さ  $l$ 、幅  $w$ 、厚さ  $d$  で厚さ方向に分極されている圧電横効果振動子（電極面：長さ×幅）を電極ピンで保持し、その電氣的共振周波数近傍の交流電圧  $e$  を印加してバースト駆動し高振動レベル状態としたのち、交流電圧を  $e = 0 \text{ V}$  とし、その時の振動速度  $v$  及び電源電流  $i$  の減衰波形（図2）をレーザドップラ振動速度計及び電流プローブで測定するとともに、デジタルストレージオシロスコープに記録する。図2の減衰波形において、任意の時刻の瞬時的な電流振幅  $I_0$ 、振動速度振幅  $V_0$ 、振動速度の共振周波数  $f_v$ （共振角周波数  $\omega_v$ ）、振動速度の減衰定数  $\beta_v$  を測定する。圧電横効果振動子の場合、これらの各振動レベルの値から力係数  $A$ 、機械的品質係数  $Q_m$ 、材料定数の弾性コンプライアンス  $s_{11}^E$ 、圧電定数  $d_{31}$ 、中心部の最大振動応力  $T_m$  等を次式等を用いて算出するものである。

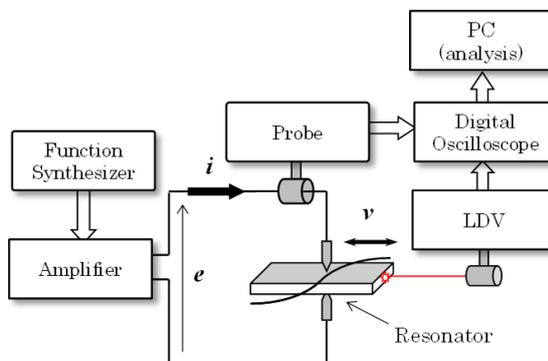


図1 実験装置の概略図

$$A = \frac{I_0}{V_0} \quad (1)$$

$$Q_m = \frac{\omega_v}{2\beta_v} \quad (2)$$

$$s_{11}^E = \frac{\pi^2}{\omega_v^2 \rho l^2} \quad (3)$$

$$d_{31} = \frac{A s_{11}^E}{2w} \quad (4)$$

$$T_m = \sqrt{\frac{\rho}{s_{11}^E}} \cdot V_0 \quad (5)$$

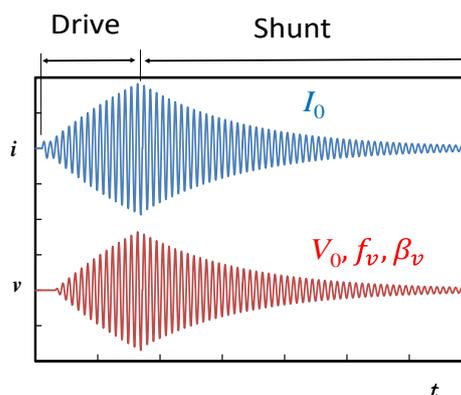


図2 電流及び振動速度の過渡波形概念図

次に本研究の方法について述べる。

(1) 反共振点での振動レベル特性

図 1 において、パルス駆動後に圧電振動子と交流電源を接続する電気回路を強制的に遮断し、圧電振動子の電気端子を開放状態として反共振状態の実現を試みる。また、圧電横効果振動子と圧電縦効果振動子を組み合わせた複合振動子を用いて圧電縦効果振動子の反共振特性の測定を試みる。さらに、コンデンサ挿入法を提案し、共振-反共振間の測定を試みる。

(2) 電氣的共振下における圧電縦効果振動子の振動レベルの測定

圧電縦効果振動子の場合、圧電横効果振動子に比べ、高振動レベルまで励振するには高電圧電源が必要となる一方、動電流は小さい値となるため、図 1 において高出力電圧の電源と高精度の電流プローブを用いて前記した電氣的過渡応答法に従い振動レベル特性を測定し、圧電横効果振動子の特性と比較する。

(3) 簡易測定法

図 1 でレーザドップラ振動速度計を用いずに簡易的に高振動レベル下での特性を測定算出する方法を検討する。本来の電氣的過渡応答法による解析結果と比較し、簡易的測定法としての可能性を探る。

4. 研究成果

(1) 反共振点での振動レベル特性

図 1 の交流電源と圧電振動子の間に電磁式リレーを挿入し、回路を強制的に遮断する方法を行ったが、スイッチ解放時のチャタリングと圧電振動子からの高出力電圧等の影響で電源や回路が破損したため、この方式を断念した。次いで図 3 に示す圧電横効果振動子と圧電縦効果振動子から構成される複合振動子 (#C 振動子) により、圧電縦効果振動子の共振・反共振周波数を測定算出する方法を検討した。材質は(株)富士セラミックス社製 C-205 で、サイズは  $2l = 50 \text{ mm}$ ,  $w = 7 \text{ mm}$ ,  $d = 2 \text{ mm}$  であり、 $P$  は分極である。1-1'端子側が駆動用圧電横効果振動子、2-2'側が被測定試料となる圧電縦効果振動子であり、一体焼成されている。ここで、2-2'端子を短絡又は開放し、その共振周波数の変動を測定し、図 4 に示す  $l = 25 \text{ mm}$ ,  $w = 7 \text{ mm}$ ,  $d = 2 \text{ mm}$  の圧電横効果振動子 (#T 振動子) の周波数特性を用いて圧電縦効果振動子単体の主要乗数を算出した。そして図 5 に示す  $l = 25 \text{ mm}$ ,  $w = 7 \text{ mm}$ ,  $d = 2 \text{ mm}$  の圧電縦効果振動子 (#L 振動子) の特性を測定し、複合振動子法による結果と比較した。表 1 にインピーダンスアナライザで測定された低振動レベル時の共振周波数  $f_r$ 、反共振周波数  $f_a$  と主要な物理定数を示す。ここで、 $\alpha$  は #C 振動子と #T 振動子の測定結果より算出した結果であり、 $\beta$  は #L 振動子単体で測定算出された値で  $Y$  は誤差率である。これより、共振周波数  $f_r$  の誤差率は 2% 以下で反共振周波数  $f_a$  の誤差率は 5% 以上であった。また、比誘電率  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$  の誤差率と弾性コンプライアンス  $s_{33}^E$  の誤差率は 5% 弱であった。一方、圧電定数  $d_{33}$ 、電気機械結合係数  $k_{33}$  の誤差率は 10% 以上と大きな値となったため、この測定方法の採用を見合わせることにした。大きな誤差率が生じた原因として、共通電極と分極処理の影響によるものと推察された。次に図 1 において、電源と圧電素子の間に外部キャパシタ  $C_x$  を直列に接続し、電氣的共振周波数を変動させて電氣的過渡応答法を適応し、圧電横効果振動子の各共振周波数下における振動レベル特性を測定した、なお、圧電横効果振動子は(株)富士セラミックス社製 C-213 材で、 $l = 43 \text{ mm}$ ,  $w = 7 \text{ mm}$ ,  $d = 1 \text{ mm}$  である。

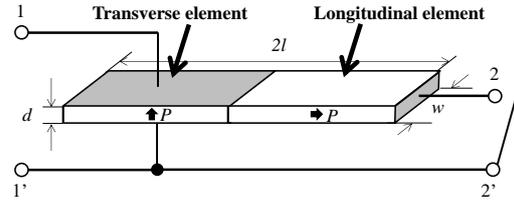


図 3 複合振動子 (#C 振動子)

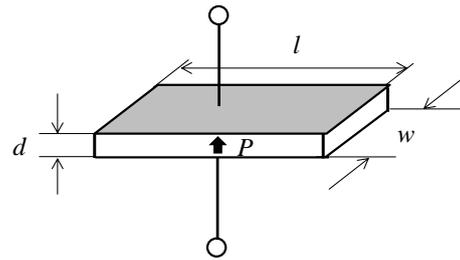


図 4 横効果振動子 (#T 振動子)

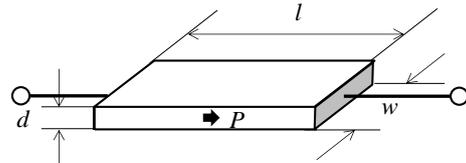


図 5 縦効果振動子 (#L 振動子)

表 1 算出結果の比較

Constants	Calculation result $\alpha$	Actual measurement result $\beta$	Error rate (%) $Y = \frac{\alpha - \beta}{\alpha} \times 100$
$f_r$ (Hz)	$6.44 \times 10^4$	$6.35 \times 10^4$	1.42
$f_a$ (Hz)	$7.74 \times 10^4$	$8.19 \times 10^4$	-5.49
$s_{33}^E$ ( $\text{m}^2/\text{N}$ )	$1.28 \times 10^{-11}$	$1.34 \times 10^{-11}$	-4.56
$d_{33}$ (C/N)	$2.48 \times 10^{-10}$	$2.81 \times 10^{-10}$	-11.9
$k_{33}$	$5.90 \times 10^{-1}$	$6.70 \times 10^{-1}$	-11.3
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	$1.53 \times 10^3$	$1.48 \times 10^3$	3.41

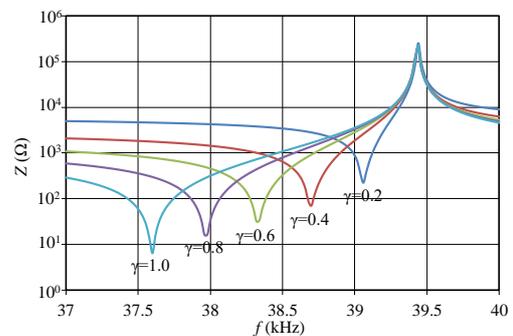


図 6 外部キャパシタを変化させた時のインピーダンス特性

ここで、圧電横効果振動子の静電容量  $C_d$  と外部キャパシタ容量  $C_x$  を用いて、以下の式で  $\gamma$  を定義する。なお、 $\gamma=1$  は  $C_x$  の無い圧電振動子単体の値とする。

$$\gamma = \frac{C_x}{C_x + C_d} \quad (6)$$

実験に先立ち、圧電横効果振動子と外部キャパシタを直列接続した回路のインピーダンス  $Z$  の特性を測定した(図6)。これより、 $\gamma$  の値を小さくすると、電氣的共振周波数は反共振周波数方向に高くなるのがわかる。図7に基本調波周波数  $f_{(1)}$  と基本調波の振動速度振幅  $V_{(1)}$  の関係を示す。これより振動速度振幅  $V_{(1)}$  が増加すると基本調波周波数  $f_{(1)}$  は低下しており、他の高調波周波数成分も同様な傾向であることが確認された。このように外部キャパシタ容量を小さくして電氣的共振周波数を反共振周波数方向に移動させて測定ができることを確認したが、その結果に外部キャパシタの特性変化も含まれその分離が難しいことから、本方式による測定を見送ることとした。

(2) 電氣的共振下における圧電縦効果振動子の振動レベルの測定

実験に先立ち、図4, 5に示してある#T振動子と#L振動子で電氣的共振下での振動速度分布と振動応力分布について理論的な算出を行った。各振動子の材質はいずれも(株)富士セラミックス社製C-205材で、サイズは  $l=25\text{ mm}$ ,  $w=7\text{ mm}$ ,  $d=2\text{ mm}$  である。図1の実験装置を用い、日本工業規格 JIS R 1699-2 従い任意の振動レベルにおける振動速度の振幅  $V_0$  と共振角周波数  $\omega_r$ 、電流の振幅  $I_0$ 、減衰定数  $\beta_v$  を測定算出した。まず、#L振動子と#T振動子の振動速度レベル特性を比較する。振動速度が  $v=0.1\text{ m/s}_{(0p)}$  時における電氣的共振周波数  $f_r$  と機械的品質係数  $Q_{mr}$  を基準値とし、それぞれの振動速度  $v$  における  $f_r$  の変化率  $\delta f_r$  と  $Q_{mr}$  の変化率  $\delta Q_{mr}$  を算出した。結果を図8, 9に示す。これより、#L振動子、#T振動子共に、電氣的共振周波数の変化率  $\delta f_r$  は負の値であり、振動速度が  $v=1.0\text{ m/s}_{(0p)}$  では#T振動子の電氣的共振周波数の変化率  $\delta f_r$  は  $-0.93\%$  程度であるのに対し、#L振動子では  $\delta f_r$  は  $-0.53\%$  程度と#T振動子の  $60\%$  程度であることがわかる。また、機械的品質係数の変化率  $\delta Q_{mr}$  も同様な傾向であることが確認できる。

次に機械的損失パワー密度  $P_d$  を次式から算出した。

$$P_d = \frac{1}{4} \alpha \rho v_{\theta/2}^2 \omega_r Q_m^{-1} \quad (7)$$

ここで、 $\alpha$  は等価質量補正係数であり、#T振動子では  $\alpha=1.0$ 、#L振動子では  $\alpha=0.914$  とした。図10より速度増大と共に#L振動子と#T振動子の機械的損失パワー密度  $P_d$  も増大するが、振動速度が  $v=1.0\text{ m/s}_{(0p)}$  では#T振動子のパワー密度が  $P_d=1300\text{ kW/m}^3$  であるのに対し、#L振動子では  $P_d=600\text{ kW/m}^3$  と#T振動子の  $50\%$  程度となっていることがわかる。また、図11より振動速度増大と共に#L振動子、#T振動子の中心部の最大振動応力  $T_{1m}$ ,  $T_{3m}$  も増大するが、振動速度が  $v=1.0\text{ m/s}_{(0p)}$  では#T振動子の振動応力は  $T_{1m}=26\text{ MPa}$  であるのに対し、#L振動子では  $T_{3m}=21\text{ MPa}$  と#T振動子の

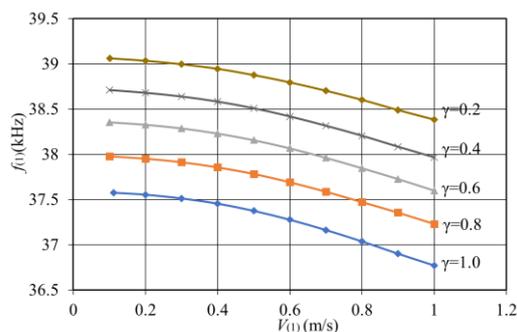


図7 外部キャパシタを変化させた時の共振周波数の振動レベル特性

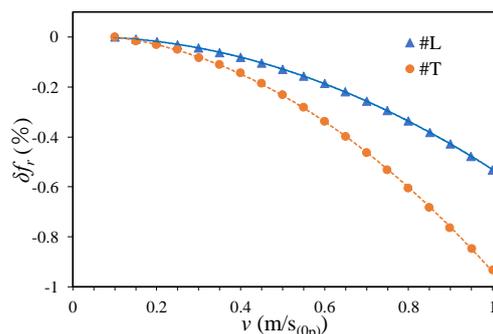


図8 各振動子における共振周波数の変化率と振動速度との関係

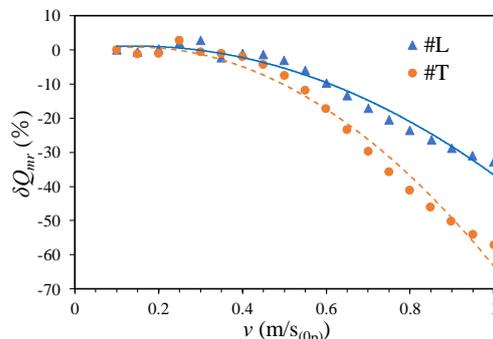


図9 各振動子における機械的品質係数の変化率と振動速度との関係

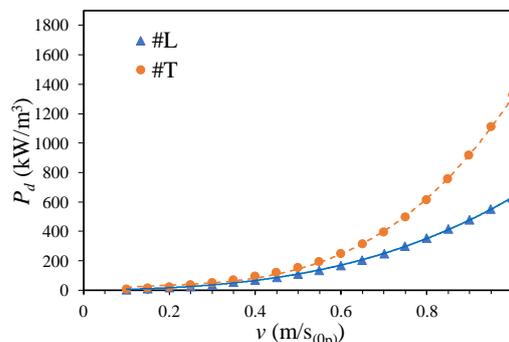


図10 各振動子における機械的損失パワー密度の振動レベル特性

80%程度となっていることがわかる。すなわち振動速度が同じであっても振動応力に差が生じていることがこれら特性の異なる主要因と推察された。いずれにせよ、同じ振動速度で用いるならば、共振周波数や機械的品質係数の変化率が小さく、損失パワー密度の小さい#L 振動子の方が有利であることがわかった。なお、ここでは縦効果の電気機械結合係数を一定、あるいは数%程度の変化は許されるものと仮定している。

一方、 $v=1$  m/s 以上の振動速度レベルにおいて、#L 振動子及び#T 振動子の振動速度及び電流をスペクトル解析した結果、両者に基本周波数成分の2倍、3倍の高調波成分が確認された(図12)。それぞれの高調波成分において、基本周波数成分との位相関係を解析したところ、#L 振動子と#T 振動子では若干その特性が異なることが確認され、その理由を現在考察中である。いずれにせよ、圧電縦効果振動子の電氣的共振下での振動レベル特性の測定が可能であることがわかった。

### (3) 簡易測定法

今回提案する簡易測定解析法では、振動速度を測定しないこととするため、インピーダンスアナライザで測定した力係数  $A_L$  を一定値とみなし(1)式に代入し振動速度振幅  $V_0$  を算出する。また、振動速度の共振角周波数  $\omega_v$  の代わりに電流の共振角周波数  $\omega_i$  を、振動速度の減衰定数  $\beta_v$  の代わりに電流の減衰定数  $\beta_i$  を用いて(2)~(5)式に代入し各定数の振動応力依存性を簡易的に算出する。ここで使用する圧電横効果振動子は(株)富士セラミックス社製 C-213、C-201、C-21 材の3種類とし、いずれも  $l=43$  mm、 $w=7$  mm、 $d=1$  mm である。横軸を中心部の最大振動応力  $T_m$  としたときの主要定数の振動レベル解析結果を図13に示す。ここで、本来の電氣的過渡応答法による解析結果を#A、今回提案する簡易的方法による解析結果を#Bとした。図13(a)より、機械的品質係数  $Q_m$  は#A、#B ともにおよそ同じ傾向となった。これは、共振角周波数  $\omega_v$  と  $\omega_i$ 、減衰定数  $\beta_v$  と  $\beta_i$  の測定結果がおよそ同じ値であったためと考えられる。また図13(b)より、弾性コンプライアンス  $s_{11}^E$  についても#A と#B でおよそ同じ傾向となった。こちらも共振角周波数  $\omega_v$  と  $\omega_i$  の測定結果がほぼ同じ値であったためと考えられる。一方、図13(c)より、圧電定数  $d_{31}$  は#A に比べ#B の変化が少ないものとなった。この主たる理由として力係数  $A_L$  をインピーダンスアナライザで測定された力係数  $A_L$  を一定値として用いて算出したためと考えられる。いずれにせよ、簡易的な振動レベル特性の傾向を測定する手法としてある程度有用と考えられる。

### <今後の展望>

電氣的過渡応答法により電氣的共振下での圧電縦効果振動子の高振動レベルも測定することが可能であること、提案した簡易的な測定法でも高振動レベル下での特性の傾向を測定するのにある程度有用であることがわかった。本測定法を展開することにより、より簡易的に多くの圧電材料のハイパワー特性を測定することができるため、ハイパワー用圧電材料の開発が進展するものと期待される。

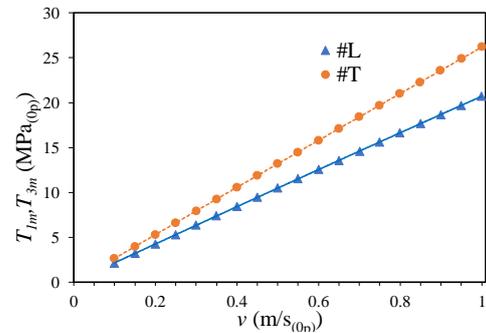
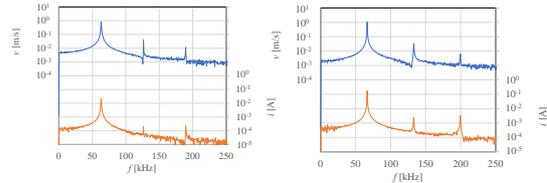
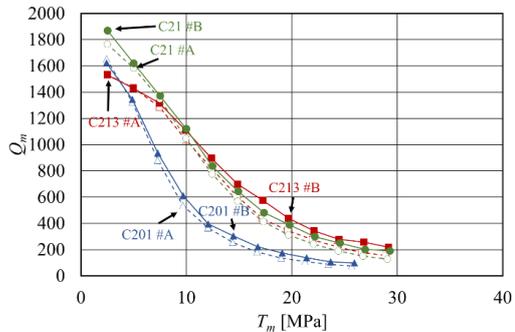


図11 各振動子における中心部の振動応力の振動レベル特性

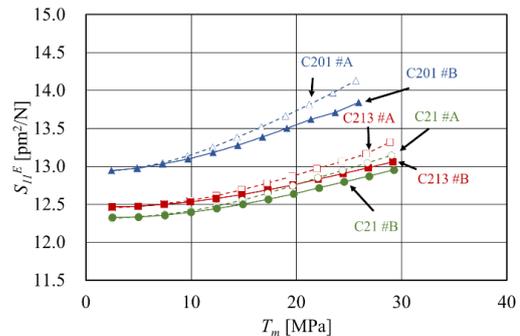


(a) #L 振動子 (b) #T 振動子

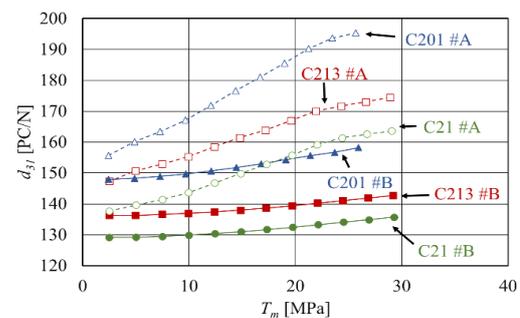
図12 各振動子における振動速度及び電流のスペクトル波形



(a) 機械的品質係数



(b) 弾性コンプライアンス



(c) 圧電定数

図13 通常の測定結果(#A)と簡易測定結果(#B)の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 梅田幹雄, 高橋貞行	4. 巻 77
2. 論文標題 圧電縦効果縦振動子のハイパワー特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本音響学会論文誌	6. 最初と最後の頁 643, 649
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20697/jasj.77.10_643	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水誠矢, 梅田幹雄
2. 発表標題 大振幅振動下における圧電縦効果セラミック振動子の高調波
3. 学会等名 令和3年度(第31回)電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川太一, 梅田幹雄
2. 発表標題 圧電素子における大振幅振動特性の簡易測定解析法の検討
3. 学会等名 令和3年度(第31回)電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 諸橋颯大, 梅田幹雄
2. 発表標題 PZT圧電素子における高振動レベル領域の経時変化
3. 学会等名 第26回高専シンポジウムオンライン口頭発表
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤祐貴, 梅田幹雄
2. 発表標題 電氣的過渡応答法における高振動レベル特性の簡易測定解析法の検討
3. 学会等名 第26回高専シンポジウムオンライン口頭発表
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠田利矢, 梅田幹雄
2. 発表標題 電氣的共振下における圧電縦効果振動子のハイパワー特性
3. 学会等名 第29回電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上将太, 梅田幹雄
2. 発表標題 電氣的共振・反共振間における大振幅振動下での圧電振動子の非線形特性
3. 学会等名 第29回電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠田利矢, 梅田幹雄
2. 発表標題 複合振動子法による圧電縦効果素子の共振特性測定
3. 学会等名 第24回高専シンポジウム in Oyama
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田浩太, 梅田幹雄
2. 発表標題 高振動レベルにおける圧電トランス素子の非線形特性
3. 学会等名 第28回電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠田利矢, 梅田幹雄
2. 発表標題 複合振動子法による圧電縦効果の諸特性測定方法の検討
3. 学会等名 第28回電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田浩太, 梅田幹雄
2. 発表標題 電氣的過渡応答法による圧電トランスの高振動レベル特性測定
3. 学会等名 第27回電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------