

報 文

圧電セラミックスを利用した衝撃力の測定

茨城職業訓練短期大学校 竹 内 生 公

Measurement of Impact Force Using with The Piezo Ceramics

Seikou Takeuchi

要 約 圧電セラミックスを利用して、衝撃力の大きさを測定するとき出力電圧の波形尾部に負の電圧が発生することがあって、正確な力測定に誤差を及ぼしやすい。そこで、本研究ではこの負の電圧の発生要因に関して理論解析と実験を行なっている。この結果、負の電圧の発生は電気回路の動特性のよるもので、衝撃継続時間に対応する測定回路の時定数を選定する必要があることを明らかにしている。さらに、圧電セラミックを用いて衝撃力の大きさを正しく測定するために必要な校正方法についても論じている。

I 序文

これからの時代に対応した職訓短大における教育訓練では新素材に対する知識の獲得は欠かせないものと考えられる。新素材の代表的なもののひとつとして、最近ファインセラミックスが問題となることが多い。そこで、ファインセラミックスの種類、特性、製造法、応用などを取り上げることが急務のことと思われる。

ファインセラミックスは硬脆材料であって、加工の困難性が高い。そのため、一方法として超音波機械加工を卒業研究テーマとして取り上げてゐる。しかし、周波数20kHz以上、工具先端振幅10～60 μ mの超音波機械加工において、ファインセラミックスに作用する衝撃力を正確に測定するにはいろいろの問題が存在する。現在までに種々の測定法が試みられているが、それらのうち主なものはひずみゲージを利用した力計^{1),2)}および圧電セラミックスを利用した力計²⁾⁻⁴⁾とに分類することができる。高い周波数での現象を正確に測定するにはひずみゲージを用いたのでは困難な場合が多く、圧電セラミックスを用いる方が適している。しかし、出力波形の尾部に負の電圧が発生することがあって、正確な力測定に誤差を及ぼしやすい。従来の研究ではこの点に関してほとんど検討されていない。

そこで、本研究では圧電セラミックスを用いて、衝撃力

を測定するとき出力電圧の波形尾部に発生する負の電圧に及ぼす諸要因について、理論解析と実験を行なった。この結果、負の電圧の発生は測定回路の動特性によるもので、衝撃継続時間に対応する測定回路の時定数を選定する必要があることを明らかにした。さらに、圧電セラミックスを用いて衝撃力の大きさを正しく測定するために必要な校正方法についても論じた。

II 主な使用記号

a	: 加振振幅	(m)
Ce	: 外部静電容量	(F)
Co	: 圧電セラミックスの静電容量	(F)
C	: 合成静電容量	(F)
d _{ij}	: 圧電定数	(C/N)
E _m	: 慣性力による最大出力電圧	(V)
F	: 衝撃力	(N)
F _m	: 最大衝撃力	(N)
H	: 圧電セラミックスの厚さ	(m)
Ka	: 感度係数	(N/V)
M, m	: 質量	(kg)
R	: 入力抵抗	(Ω)
T _d	: 衝撃継続時間	(s)
V _m	: 衝撃力による最大出力電圧	(V)
ϵ	: 誘電率	(F/m)
τ	: 時定数	(s)
ω	: 角振動数	(rad/s)

論文受け日 1989. 3. 8

III 衝撃力測定装置の設計法

1. 理論解析式

図1は圧電セラミックスを含む測定回路の等価回路で、 qS は圧電セラミックスが外力に比例して発生する電荷、 C_0 は圧電セラミックスの静電容量、 C_c はケーブルの静電

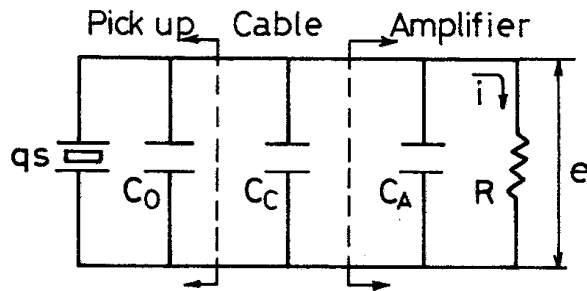


図1 等価回路

容量、 C_A は入力側の静電容量、 R は入力抵抗である。入力抵抗 R に加わる電圧を e 、電流を i としたとき、電圧 e に関する方程式は次式になる⁹⁾。

$$\frac{de}{dt} + \frac{e}{\tau} = \frac{d_{ij}}{C} \cdot \frac{Sd\sigma}{dt} \quad (1)$$

ここで、 τ は時定数で $\tau = CR$ 、 C は合成静電容量で $C = C_0 + C_c + C_A$ 、 d_{ij} は圧電定数、 S は圧電セラミックスの面積、 σ は応力である。

図2に示す半波正弦波状の衝撃力が圧電セラミックスに作用し、

$$\left. \begin{aligned} S\sigma &= F_m \sin \frac{\pi t}{T_d}, \quad (0 \leq t \leq T_d) \\ &= 0, \quad (T_d \leq t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

の電荷が発生したときの電圧 e の変化を調べる。式(2)を

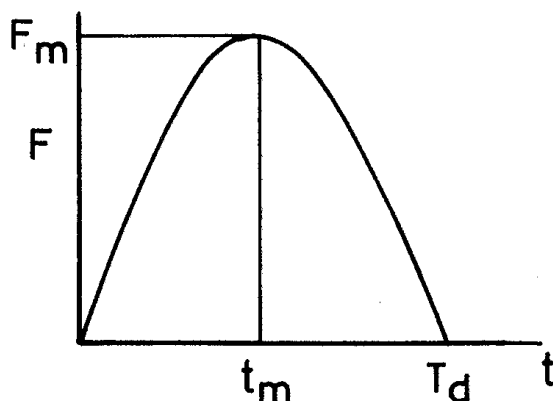


図2 衝撃力波形図

式(1)に代入することにより次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{de}{dt} + \frac{e}{\tau} &= \frac{d_{ij} F_m \pi}{C T_d} \cdot \cos \frac{\pi t}{T_d}, \quad (0 \leq t \leq T_d) \\ &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)を $t=0$ で、 $e=0$ の初期条件で解くと $0 < t < T_d$ に対して、

$$\left. e \right|_{0 < t < T_d} = -\frac{d_{ij} F_m}{C} \left[\frac{T_d/\tau}{\pi^2 + (T_d/\tau)^2} \cdot e^{-t/\tau} - \frac{1}{\sqrt{\pi^2 + (T_d/\tau)^2}} \cos \left(\frac{\pi t}{T_d} - \phi \right) \right] \quad (4)$$

となる。ただし、

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\pi}{T_d/\tau} \quad (5)$$

$t = T_d$ のときの電圧 e の値は式(4)より

$$\left. e \right|_{t=T_d} = -\frac{d_{ij} F_m \pi}{C} \cdot \frac{T_d/\tau}{\pi^2 + (T_d/\tau)^2} \times (1 + e^{-T_d/\tau}) \quad (6)$$

となる。 $t > T_d$ に関して解くと次式を得る。

$$\left. e \right|_{t < T_d} = -\frac{d_{ij} F_m \pi}{C} \cdot \frac{T_d/\tau}{\pi^2 + (T_d/\tau)^2} \times (1 + e^{T_d/\tau}) e^{-t/\tau} \quad (7)$$

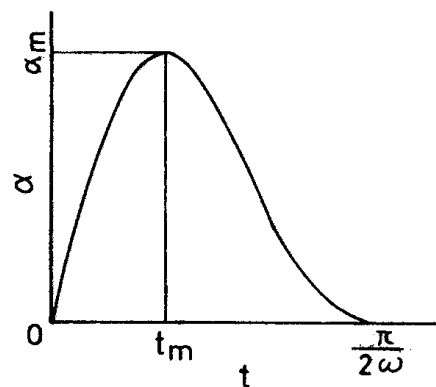


図3 入力波形

次に、衝撃的な加速度 α により、図3に示す衝撃力が圧電セラミックスに作用した場合を考える。このときの加速度 α は次式で表わせる。

$$\alpha = \alpha_m \left(\sin 2\omega t + \frac{1}{2} \sin \omega t \right) \quad (8)$$

ここで、 α_m は衝撃物体の最大加速度、 ω は衝撃力の角振動数である。

図1の入力抵抗Rに加わる電圧を e_0 とするとこれに関する方程式は

$$\begin{aligned} \frac{de_0}{dt} + \frac{e_0}{\tau} &= \frac{d_{ij}}{C} M \frac{d\alpha}{dt} \\ &= \frac{d_{ij}}{C} M \alpha_m 2\omega (\cos 2\omega t + \cos 4\omega t), \end{aligned} \quad (9)$$

となり、Mは衝撃物体の質量である。上式の基本解 e_{of} と特殊解 e_{op} は C_1 を任意定数として次式になる。

$$\begin{aligned} e_{of} &= C_1 e^{-t/\tau}, \\ e_{op} &= -\frac{d_{ij}}{C} M \alpha_m \cdot 2\omega \tau \left[\frac{\cos 2\omega t + 2\omega \tau \sin 2\omega t}{1 + (2\omega \tau)^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\cos 4\omega t + 4\omega \tau \sin 4\omega t}{1 + (4\omega \tau)^2} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)を $t=0$ で、 $e_0=0$ の初期条件で解き、 C_1 を決定すると

$$C_1 = -\frac{d_{ij}}{C} M \alpha_m \cdot 2\omega \tau \left[\frac{1}{1 + (2\omega \tau)^2} + \frac{1}{1 + (4\omega \tau)^2} \right], \quad (11)$$

となる。電圧 e_0 は $0 < t < \pi/2\omega$ に対して次式となる。

$$\begin{aligned} e_0 &= -\frac{d_{ij}}{C} M \alpha_m \left[\frac{2\omega \tau}{1 + (2\omega \tau)^2} + \frac{2\omega \tau}{1 + (4\omega \tau)^2} \right] e^{-t/\tau} \\ &\quad + \frac{d_{ij} M \alpha_m}{C} \left[\frac{2\omega \tau}{\sqrt{1 + (2\omega \tau)^2}} \cdot \sin(2\omega \tau + \delta) \right. \\ &\quad \left. + \frac{2\omega \tau}{\sqrt{1 + (4\omega \tau)^2}} \sin(4\omega \tau + \delta') \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、 $\delta = \tan^{-1} \omega \tau$ 、 $\delta' = \tan^{-1} 2\omega \tau$ である。

さらに、 $t \geq \pi/2\omega$ で衝撃力は零となるから

$$\left. \begin{aligned} \frac{de_0}{dt} + \frac{e_0}{\tau} &= 0 \\ e_0 &= C_2 \cdot e^{-t/\tau} \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

となる。 C_2 は任意定数で、 $t = \pi/2\omega$ のときの電圧を $e|_{t=\pi/2\omega}$ とおくと次式を得る。

$$C_2 = e^{\pi/2\omega \tau} \cdot e|_{t=\pi/2\omega}, \quad (14)$$

したがって、衝突終了時の電圧 e_0 は次式で表わせる。

$$e_0 = e|_{t=\pi/2\omega} \cdot e^{\pi/2\omega \tau} \cdot e^{-t/\tau} \quad (15)$$

2. 数値計算例

図4は式(4)~(7)の計算結果の一例で、無次元時間 t/T_d に対する無次元電圧 $e/(-d_{ij} F_m \cdot \pi/C)$ の応答を無次元時定数 T_d/τ をパラメータにとり示してある。図より、 T_d/τ を小さくする(時定数 τ を大きくする)と波形尾部に発生する負の電圧は減少し、 $T_d/\tau = 0.02$ で零となる。また、時定数 τ を大きくすることはカットオフ周波数 $f_c = 1/\tau$ を低くすることで、低域特性を改善することでもある。本数値計算の範囲内では無次元時定数を $T_d/\tau = 0.02$ 以下($\tau = 50 T_d$ 以上)に選べば負の電圧の発生はなくなり、衝撃継続時間 T_d およびそれより短い継続時間の衝撃力波形を忠実に取り出すことが可能となる。時定数 τ を大きくする方法のひとつに圧電セラミックスと外部静電容量 C_e を並列に接続することが考えられる。しかし、式(4)、(5)よりわかるように合成静電容量 C に比例して、電圧 e は低下する。そこで、静電容量 $C_0 (= \epsilon S/H)$ の大きい圧電セラミックス、いいかえらるなら誘電率 ϵ や圧電セラミックスの面積 S が大きく、厚み H が薄い方がよりよい低域特性が得られ、高い周波数の衝撃力を正確に測定できることになる。

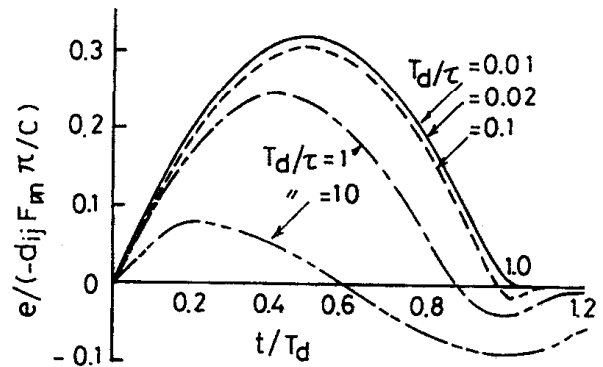


図4 出力波形

ここで、衝撃力波形の高域特性についても考える必要がある。いま問題にしている衝撃力波形は図2であり、この波形の周波数成分の分布状態を知るために、式(2)のフーリエ積分を取り、それを $E(\omega)$ で表わすと次式になる⁶⁾。

$$E(\omega) = \frac{2F_m T_d}{\pi} \cdot \frac{\cos \omega T_d / 2}{1 - (\omega T_d / \pi)^2} \quad (16)$$

図 5 は式(16)の計算例で、衝撃力波形の周波数成分は $\omega T_d / 2 = 5\pi/2$ 付近までとれば十分波形を近似できることがわかる。したがって、

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2.5}{T_d} \quad (17)$$

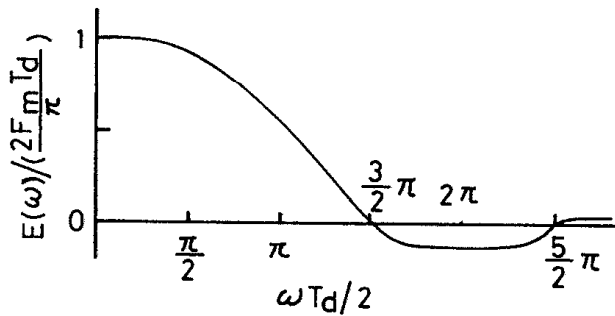


図 5 周波数成分

の周波数まで測定回路の特性がフラットであればよいことが明らかになる。いま、衝撃継続時間 T_d が 1msec の衝撃力波形が測定回路に入力されたとすると、 $f = 2.5\text{kHz}$ となりこの周波数まで高域がフラットであることを要求される。

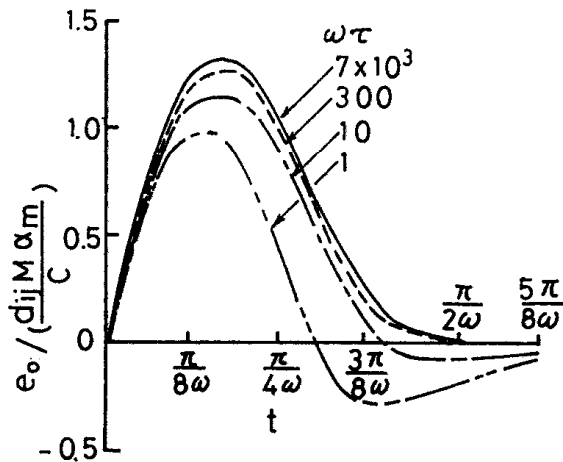


図 6 出力波形

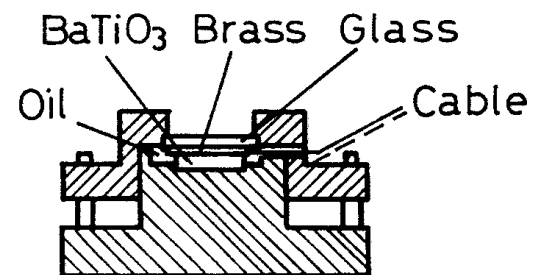
図 6 は式(12)、(15)の計算結果の一例で、 $\omega\tau$ をパラメータにとり示してある。図より、負の電圧は時定数 τ のみならず、衝撃力あるいは加速度の角振動数 ω の影響も受ける。 $\omega\tau$ が大きくなるにしたがい、負の電圧は減少し、本数値計算の範囲内では $\omega\tau = 300$ ($\tau = 47.8T_d$) 以上で負の電圧の発生はなくなる。

図 2 の衝撃力波形と図 4 の電圧波形、図 3 の衝撃力波形と図 6 の電圧波形は共に時定数を $\tau = 50T_d$ 以上に選定

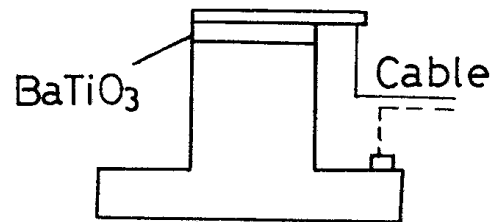
するとそれぞれの波形は相似形となり、衝撃力の大きさを正確に測定できる。これらより、感度は低下するが、測定回路の合成静電容量 C を大きくとるか、入力抵抗 R を大きくとることにより、高精度の測定ができることを明らかにすることができた。この入力抵抗 R を大きくとるためには入力回路に超高入力インピーダンス演算増幅器用の回路素子を用いるのもひとつの方法である。この種の素子は入力段に MOS FET を使用しているため、入力抵抗 $R = 10\text{M}\Omega$ 程度の値をもっている。

IV 実験装置および実験方法

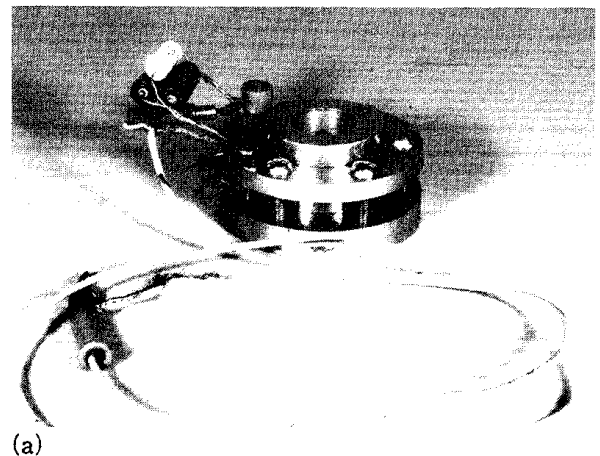
1. 実験装置



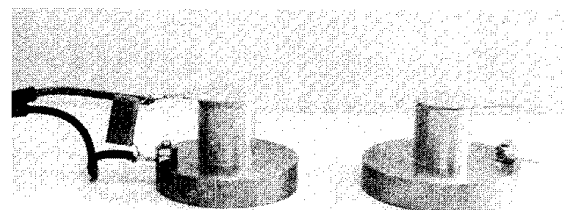
(a)



(b) 図 7 構造概要



(a)



(b)

図 8 力計外観

図 7 (a)、(b) に衝撃力測定装置の構造を、図 8 (a)、(b) にそれらの外観を示す。(a) の供試装置は黄銅で製作してあり、周囲を 6 本のボルトで固定してある。この中に厚さ $H=5\text{mm}$ 、直径 $D=20\text{mm}$ のチタン酸バリウム磁器 (BaTiO_3) が入れている。圧電セラミックスの負の電極は本体より、正の電極は圧電セラミックスのプラス極面上に薄い銅板 (厚さ 0.2mm) を置き、さらにその上にガラス板 (厚さ 5mm) を置いて本体と絶縁してリード線を用いて外部へ引出している。装置本体と銅板とで一对の電極を形成しており、これよりシールド線にてブラウン管オシロスコープまたはメモリスコープの入力端子に接続する。

図 7 (a) の供試装置の場合、圧電セラミックスは無減衰に近い状態で使用するため、自由振動により発生した電圧が、衝撃力により発生した電圧に重畳され、波形が乱れることが多い。このため圧電セラミックスの周囲にオイルを封入して、減衰を大きくして用いている。

図 7 (b) の供試装置の材質は黄銅であり、下面と上面の平行度には十分注意して製作してある。本体上面に導電性の接着剤で厚さ 2mm (図 8 (b) 左側) と厚さ 0.5mm (同図右側) の圧電セラミックスを固定し、本体側から負の電極を取り出している。正の電極は円形のプリント基板を圧電セラミックスのプラス極面に接着剤にて固定し、それより取り出している。この両電極の端子に外部静電容量を並列に接続できる構造になっており、これよりシールド線にてメモリスコープの入力端子に接続する。

表 1 に本実験に用いたチタン酸バリウム磁器の諸定数を

表 1 供試圧電セラミックスの諸定数

極板距離 $H\text{ m}$ $\times 10^{-3}$	5	2	0.5
極板面積 $S\text{ m}^2$ $\times 10^{-4}$	3.14	3.14	3.14
誘電率 $\epsilon\text{ F/m}$ $\times 10^{-8}$	1.5	1.7	1.6
圧電定数 $d_{33}\text{ C/N}$ $\times 10^{-10}$	1.5	1.5	1.5
静電容量 $C_0\text{ F}$ $\times 10^{-8}$	0.094	0.27	1.07
固有振動数 kHz (縦振動数)	450	970	3980

を示してある。表より、いずれの圧電セラミックスも直径は $\phi 20\text{mm}$ であり。圧電定数 d_{33} は等しい。極板距離 (厚み) が短く (薄く) になると静電容量 C_0 、固有振動数 (縦振動数) は大きくなる。

本実験に用いるオシロスコープおよびメモリスコープの入力抵抗は $R=1\text{M}\Omega$ 、入力静電容量は $C_A=20\text{pF}$ のものである。

2. 実験方法

供試装置に力を加える方法としては静的方法³⁾と動的方法がある。本実験では後者の動的方法を用い、2種類の実験を行なうことにする。そのひとつは動電型加振機に供試装置を固定し、種々の振動数や加振振幅に対して出力電圧を記録する方法である。もう一つは供試装置上に錘を自由落下させ、供試装置と錘を衝突させる方法である。

はじめに、動電型加振機による実験方法について述べる。供試装置を加振台上にボルトで固定し、供試装置上に質量 $m=520\text{g}$ の錘を載せて $50\sim 1000\text{Hz}$ の振動数で加振する。錘と供試装置との接触面の大きさは直径 $\phi 4\text{mm}$ と直径 $\phi 8\text{mm}$ の 2 種類の錘を用意した。各振動数において、加振振幅が一定になるように、加振機への入力電圧を調整するが、この方法だと大きな加振振幅を与えると錘がジャンピング現象を起こす。本実験では振幅 $10\mu\text{m}$ で約 100Hz 、 $5\mu\text{m}$ で約 300Hz 、 $1\mu\text{m}$ で約 1000Hz 以下の周波数で出力電圧の波形をブラウン管オシロスコープにて観測する。加振振幅は三素子振動計にて測定している。

次に、図 9 (a) に供試装置上に錘を自由落下させると

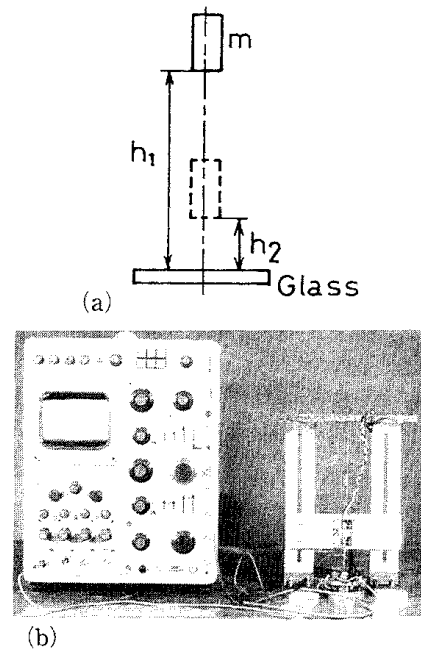


図 9 衝撃力による実験

きの概要を、(b)に全体を示す。高さ h_1 の位置から質量 m の錘で、圧電セラミックスに衝撃力を与え、それによる出力電圧をメモリスコープ上に記録する。本実験に用いた錘は先端径 $\phi 4$ mm、質量 $m=150$ g と先端径 $\phi 8$ mm、質量 $m=220$ g の丸棒で、材質は共に S45C である。高さ $h_1=2\sim 30$ cm の種々の位置からこの錘を自由落下させることにより、衝撃力の大きさを変えている。錘の反撥後の最大高さ h_2 は図 9 (b) に示しめすごとく差動トランスを用いて測定するが、 $h_1=6$ cm 以上になるとコアが巻線部より離れ測定が困難となる。この場合は差動トランスを取りはずし、錘の後方にスケールを置いて h_2 を読み取る。また、高さ h_1 を種々変えると共に供試装置上に厚さの異なるボール紙や高分子材料等の緩衝材を置き、これらを適宜組合わせることにより、衝撃継続時間や衝撃力の大きさを変化させられる。

V 実験結果および考察

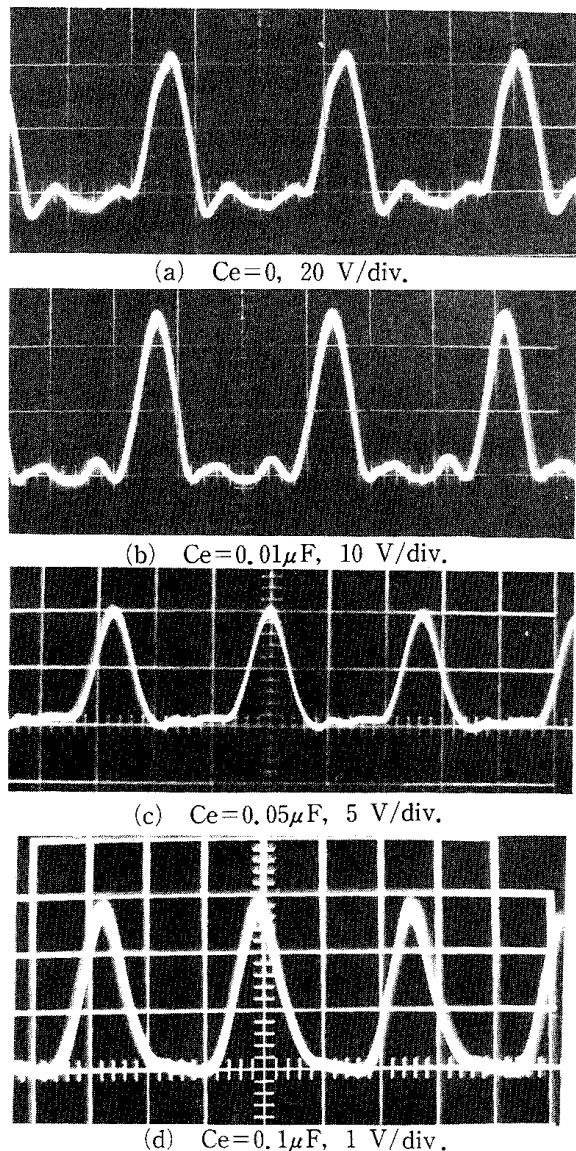


図10 記録波形

図10 (a) ~ (d) は記録波形の一例である。同図は図 8 (a) に示した供試装置に動電型加振機で慣性力を与えたときの出力電圧の波形である。図10 (a) は外部静電容量 C_e を接続しなかったときで、波形尾部に負の電圧が発生している。(b) は $C_e=0.01\mu\text{F}$ を圧電セラミックスに並列に接続したときで、負の電圧は $C_e=0$ のときに比べて半分程度に低減されているが、正の電圧も低下している。(c) は $C_e=0.05\mu\text{F}$ 、(d) は $C_e=0.1\mu\text{F}$ をそれぞれ接続したときの記録波形で、 C_e を大きくするにしたがい負の電圧の発生は抑制されている。これらの記録波形は負の電圧が発生しないことを確認するために、正の電圧波形の高さがほぼ一定になるよう垂直感度を変えて記録してある。

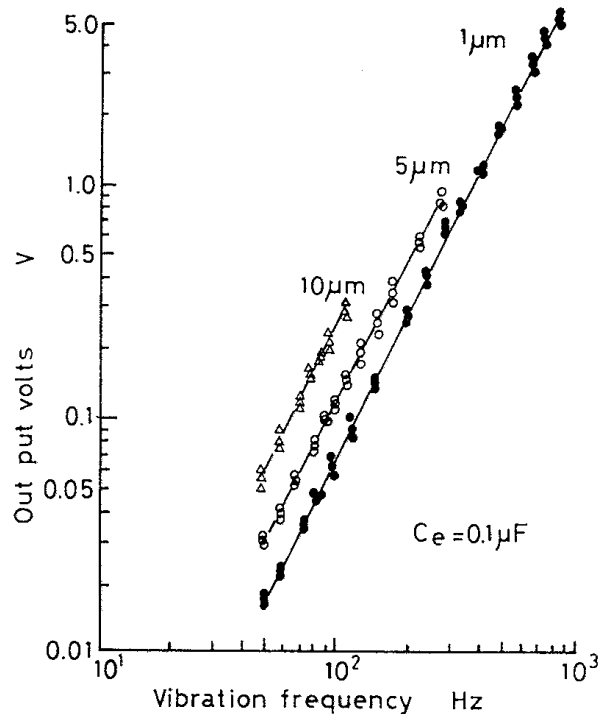
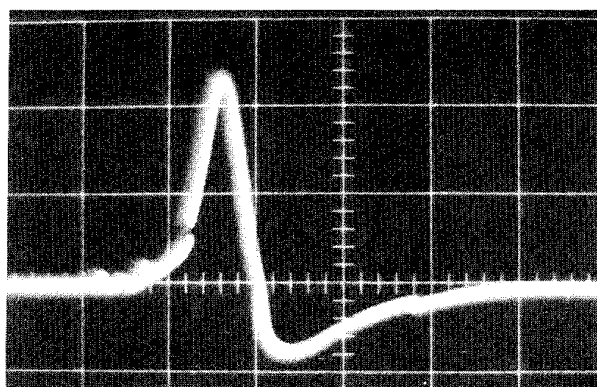
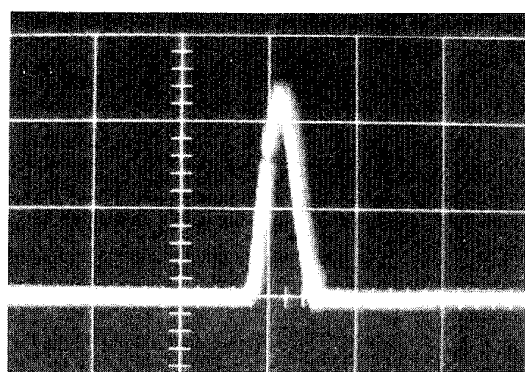


図11 振動周波数と出力電圧の関係

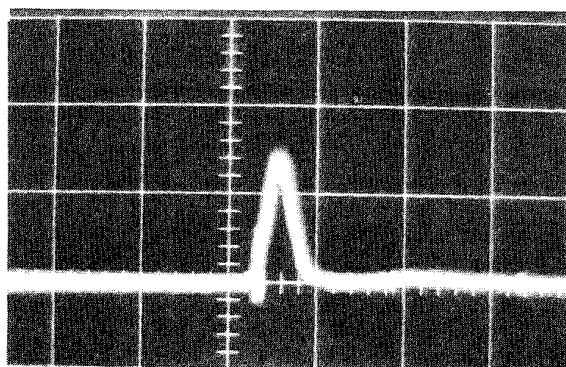
図11は供試装置の加振振動数と出力電圧の関係を示しており、加振振幅をパラメーターにとってある。図より、同一加振振幅においては加振周波数が高くなるにしたがい出力電圧は増大しており、加振周波数により出力電圧は影響を受けることがわかる。本実験の範囲内では同一加振周波数ならば加振振幅が大きいほど出力電圧は大きくなり、その変化は加振振幅の大きさに比例している。図11は外部静電容量 $C_e=0.1\mu\text{F}$ を接続したときの例であるが、他の値の C_e を接続した場合も同様の結果を得ている。さらに、供試装置の場合、圧電セラミックスを押し付けるように6本のボルトで周辺を固定してある。これの影響を調べるために、周辺のボルトを緩めた状態と固定した



(a) $C_e=0$, 20 V/div.



(b) $C_e=0.05\mu\text{F}$, 5V/div.



(c) $C_e=0.3\mu\text{F}$, 1V/div.

図12 衝撃力波形の記録

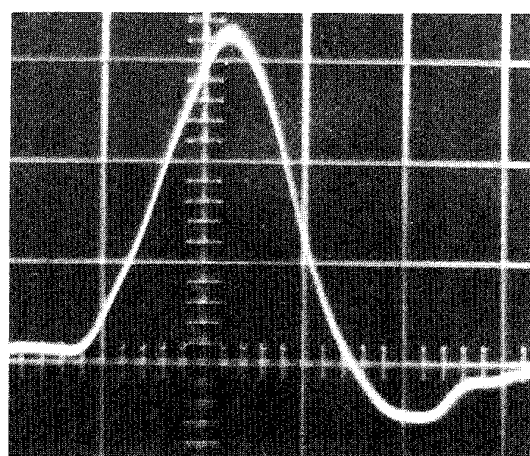
状態とで、同様の実験を行なった結果、両者の出力電圧の差は最大で6.5%であった。

図12 (a) ~ (c) は図8 (a) に示した供試装置に $m=150\text{g}$ 、先端径 $\phi 4\text{mm}$ の錘を衝突させたときの記録波形の一例である。これらも外部静電容量 C_e の値を種々変えて記録しており、衝撃力波形に相当する電圧波形である。図より (a) は $C_e=0$ で、負の電圧が発生しているが、(b) に示すように $C_e=0.05\mu\text{F}$ を接続すると負の電圧は発生しない。さらに、(c) のように $C_e=0.3\mu\text{F}$ と C_e の値を大きくしても負の電圧は発生しない。しかし、図からわかるように、 C_e を大きくするにしたがい、解析結果で述べてごとく最大電圧は減少している。図12の各図における衝撃継続時間 T_d 、時定数 τ 、それらの比 T_d/τ および $\omega\tau$ の値

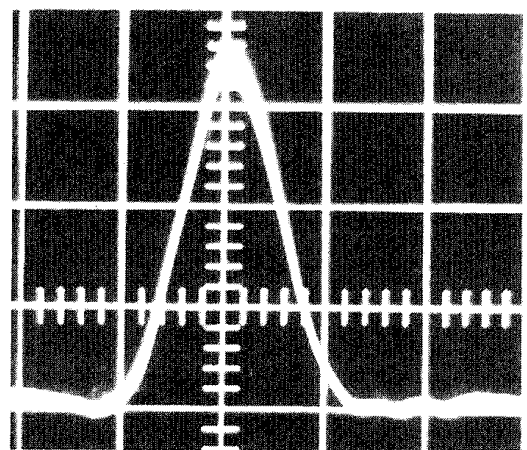
を表2に示してある。図4の計算結果では無次元時定数が $T_d/\tau=0.02$ 以下 ($\tau=50T_d$ 以上) になると負の電圧は発生していない。これと表2を比較すると表中の図番(b)において、 $T_d/\tau=0.016$ で負の電圧の発生はなく、解析結果と一致しているといえる。本来なら、 $T_d/\tau=0.02$ となる時定数 $\tau(=CR)$ で実験を行なうべきであるが、実験条件の制約上この値で実施できなかった。このため、近似値ではあるが $T_d/\tau=0.016$ の値を用いた。また、図6の計算結果においては $\omega\tau=300$ ($\tau=47.8T_d$) 以上で負の電圧は発生しない。これと図12および表2の結果を比較すると負の電圧を発生しない $\omega\tau$ の値は一致している。

表2 図12の衝撃継続時間 T_d と時定数 τ

図 番	$C_e(\mu\text{F})$	$T_d(\text{msec})$	$\tau(\text{msec})$	T_d/τ	$\omega\tau$
a	0	1	0.94	1.06	5.93
b	0.05	0.8	50	0.016	392.5
c	0.3	0.8	300	0.0027	2355



(a) $C_e=0$, 20 V/div.



(b) $C_e=0.01\mu\text{F}$, 10 V/div.

図13-(1) (2ページになっています)

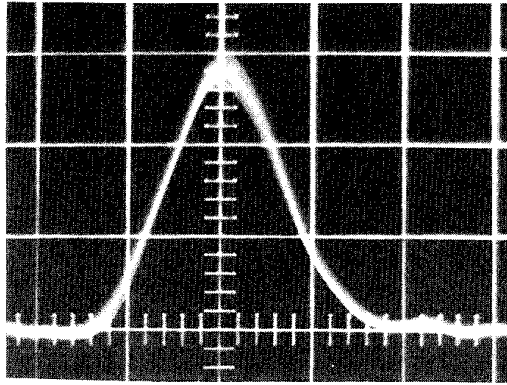
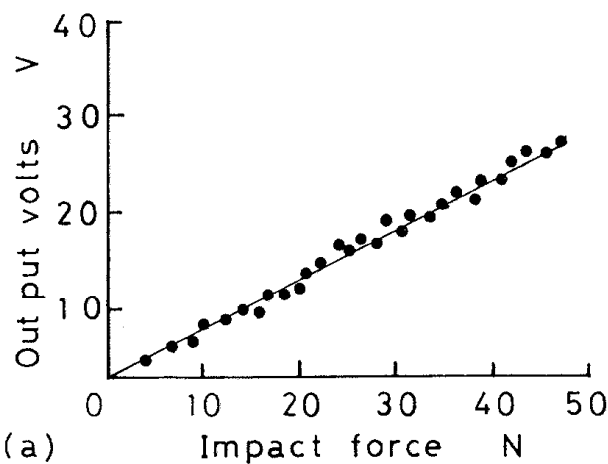
(c) $C_e = 0.05 \mu F$, 5 V/div.

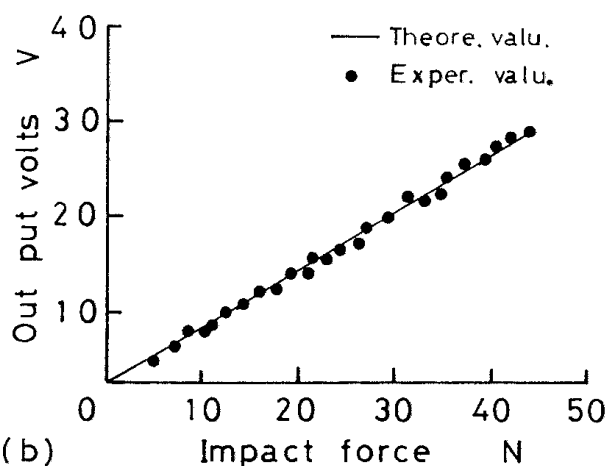
図13-(2) 衝撃力波形の記録

表 3 図13の衝撃継続時間 T_d と時定数 τ

図 番	$C_e(\mu F)$	$T_d(\text{msec})$	$\tau(\text{msec})$	T_d/τ	$\omega\tau$
a	0	0.26	2.7	0.096	62.8
b	0.01	0.22	12.7	0.017	362
c	0.5	0.28	52.7	0.0053	6619



(a)



(b)

図14 理論値と実験値の比較例

図13 (a) ~ (c) は図 8 (b) に示した供試装置の記録波形の一例で、圧電セラミックスの厚さは $H = 2 \text{ mm}$ 、錘の先端径 $\phi 4 \text{ mm}$ 、質量 $m = 150 \text{ g}$ のときである。これらの衝撃継続時間 T_d 、時定数 τ とそれらの積などは表 3 に整理してある。表 3 と表 2 を比較すると T_d が表 2 のそれに比べて約 $1/4$ となっている。圧電セラミックスの厚さが薄くなり、短時間の衝撃力が作用した場合でも図12と同様の結果が得られている。図13と表 3 より、負の電圧は $C_e = 0.01 \mu F$ 、 $T_d/\tau = 0.017$ ($\tau = 57.7 T_d$)、 $\omega\tau = 362$ 以上になると発生していない。これと図 4 および図 6 の計算結果を比べると負の電圧が発生しない T_d/τ と $\omega\tau$ の実験値と理論値は一致している。

図14 (a)、(b) は理論値と実験値の比較例である。理論値は表 1 の各定数、最大衝撃力 $F_m = m\sqrt{2g(h_1 + h_2)} / T_d$ などの値を用いて式 (4) より得ている。測定回路の合成静電容量 C は $C = C_A + C_C + C_e + C_0$ で表わせる。このうち、 C_A 、 C_e 、 C_0 はそれぞれカタログ値によるほかないが、実際に用いたものとの差が当然考えられる。そこで、仮に図14 (a) の場合、 $C = 0.084 \mu F$ 、(b) の場合 $C = 0.069 \mu F$ とすることにより、理論値と実験値はかなりよく一致していることが明らかである。

また、図 2、図 3 の衝撃力波形と図12、図13における負の電圧の発生を抑制したときの波形はそれぞれ相似形をしており、理論解析の正しさを裏付けている。圧電セラミックスの厚さが薄い場合でも、短い衝撃継続時間をもつ衝撃力が作用した場合でも衝撃継続時間の50倍以上の時定数をもつ測定回路を用いることにより衝撃力の大きさを精度よく測定することができることを明らかにした。

VI 衝撃力測定装置の校正

圧電セラミックスを用いて衝撃力の大きさを測定するにはその前に校正が必要である。前節までの実験結果をもとに校正方法について述べる。

動電型加振機で供試装置に慣性力を与える場合、加振振幅を a 、供試装置に載せる錘の質量を m 、加振角振動数を ω とすると、慣性力 $ma\omega^2$ と圧電セラミックスの出力電圧の関係を図示すると図15を得る。同図は図 8 (a) に示した装置を用い、 $C_e = 0.1 \mu F$ を接続したときの校正線図である。図より、慣性力とそれによる出力電圧は比例しており、供試装置に接触する錘の大きさにより出力電圧は異なる。このように、加振周波数と接触面の大きさにより出力電圧は異なることから、被測定物の接触面形状の同じ物体と被測定用振動周波数に等しい加振振動数を用いて、校正することが重要となる。

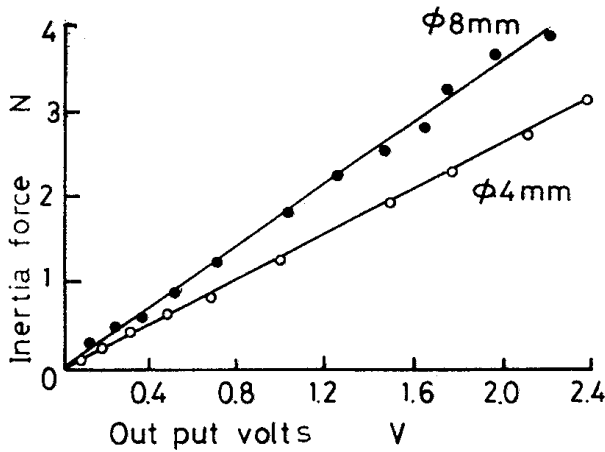


図15 慣性力と出力電圧の関係

慣性力と出力電圧との変換係数（感度係数）を K_a とし、図10に示した出力電圧の最大値を E_m とすれば K_a は次式で与えられる。

$$K_a = \frac{m\omega^2 a \sin \omega t}{E_m} \quad (\text{N/V}) \quad (18)$$

供試装置（厚さ $H = 5 \text{ mm}$ ）の K_a は錘の先端径 $\phi 4 \text{ mm}$ のとき $K_a = 1.22 \text{ N/V}$ 、 $\phi 8 \text{ mm}$ のとき $K_a = 1.75 \text{ N/V}$ である。

次に、図12、図13に示した電圧波形が得られたとき、波形の第1半波が時間軸と接するまでの面積を衝撃力 F 、それまでの時間を衝撃継続時間 T_d 、最大電圧を V_m 、衝撃力と出力電圧の変換係数（感度係数）を K_a とし、その波形の面積を正弦波形で近似すると衝撃力 F は次式で与えられる。

$$F = K_a \cdot V_m \cdot \sin \frac{\pi t}{T_d} \quad (19)$$

自由落下させた錘が供試装置に衝突する速度を v_1 、反発速度を v_2 とすると、錘の運動量の変化は $m(v_1 + v_2)$ であり、これは力積に等しいから

$$\int_0^{T_d} F dt = m(v_1 + v_2) \quad (20)$$

となる。これより K_a に関する次式を得る。

$$K_a = \frac{\pi m \sqrt{2g(h_1 + h_2)}}{2T_d V_m} \quad (\text{N/V}) \quad (21)$$

図16は $C_e = 0.06 \mu\text{F}$ 、厚さ $H = 5 \text{ mm}$ の圧電セラミックスの校正線図である。図より、本実験の範囲内では出力電圧と衝撃力は比例関係にある。感度係数 K_a は先端径 $\phi 4 \text{ mm}$ のとき $K_a = 1.25 \text{ N/V}$ 、 $\phi 8 \text{ mm}$ のとき $K_a = 1.8 \text{ N/V}$ となっており、動電型加振機を用いたときの K_a と同じ値を

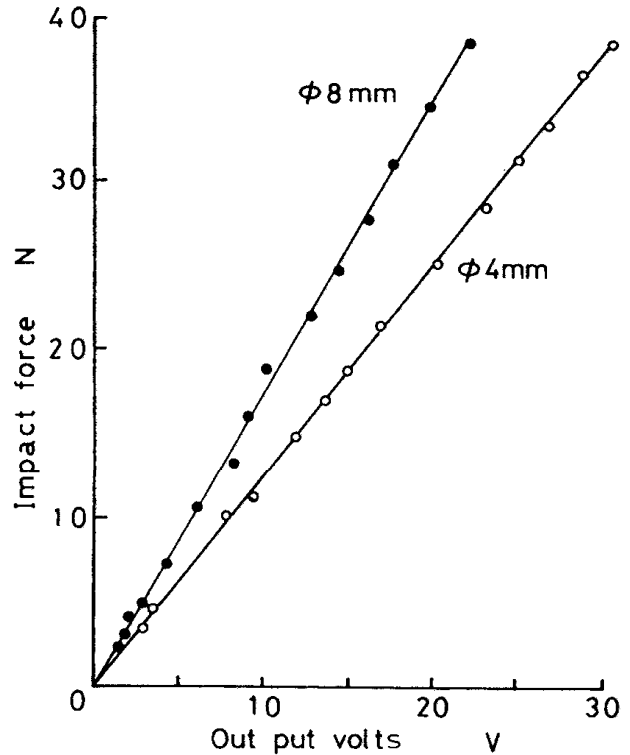


図16 校正線図の一例

示している。また、ここでは図示していないが厚さ $H = 2 \text{ mm}$ 、 $H = 0.5 \text{ mm}$ の圧電セラミックスを用いた場合も同様の校正線図が得られている。厚さ $H = 2 \text{ mm}$ 、 $C_e = 0.03 \mu\text{F}$ 、錘の先端径 $\phi 4 \text{ mm}$ のとき $K_a = 1.5 \text{ N/V}$ 、 $\phi 8 \text{ mm}$ のとき $K_a = 2.0 \text{ N/V}$ 、厚さ $H = 0.5 \text{ mm}$ 、 $C_e = 0.01 \mu\text{F}$ 、錘の先端径 $\phi 4 \text{ mm}$ のとき $K_a = 1.7 \text{ N/V}$ 、 $\phi 8 \text{ mm}$ のとき $K_a = 2.1 \text{ N/V}$ の値が得られている。

VII 結 論

衝撃力の大きさを圧電セラミックスを用いて測定するとき、出力電圧波形の尾部に発生する負の電圧に関して理論解析と実験を行なった結果、次の主な結論を得た。

- (1) 出力電圧波形の尾部に発生する負の電圧は測定回路の動特性によるもので、回路の時定数を衝撃継続時間の50倍以上に選定するとその発生はなくなる。
- (2) 負の電圧の発生を抑制することにより、入力波形と出力波形は相似形となり高い振動数の動的な力の大きさを精度よく測定できる。
- (3) 外力の振動数や衝撃力の継続時間に応じた圧電セラミックスを選定することが大切である。
- (4) 被測定物の接触面の形状や面積を計測し、それらと等しい衝突面の形状や面積をもつ物体で、実際の衝撃継続時間とはほぼ等しい衝突時間を与えて圧電セラミックスを校正することがより精度の高い測定を可能にす

る。

最後に、本研究は昭和63年度指定研究費の一部を使用させて頂き、関係各位に感謝いたします。また、本研究を遂行するにあたり貴重なご助言、ご教示を賜った本学校の小林昭校長に深甚の謝意を表しますと共にセラミックス勉強会の諸先生方に感謝いたします。実験装置の製作に多大なご協力いただいた本学校生産機械科の木内邦男教官に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 塩崎、宮下：研削動力計の動力学的解析、精密機械、35, 6 (1969) 389.
- (2) 塩崎、宮下：研削動力計の試作、精密機械、35, 7 (1969) 471.
- (3) 木本、田宮：力の測定における圧電素子の校正、精密機械、29, 3 (1963) 220.
- (4) 一ノ瀬、塩崎：エレクトロセラミックス、技報堂、1986.
- (5) 古川：振動および衝撃測定、誠文堂、新光社、昭和46.
- (6) 電子通信学会編：電子通信ハンドブック、1983.