1-3 複合圧電体による AE 変換子の試作

尾原佳信・志波光晴*・柳田博明**・岸 輝雄*

積水化成工業(株)中央研究所セラミックス研究室, 362 奈良県天理市森本町 670

*東京大学先端科学技術研究センター, 153 東京都目黒区駒場 4-6-1

**東京大学工学部工業化学科, 113 東京都文京区本郷 7-3-1

Design for AE Transducer by 1-3 Piezoelectric Composite

Yoshinobu OHARA, Mitsuharu SHIWA*, Hiroaki YANAGIDA** and Teruo KISHI*

Ceramic Research Department, Central Research Laboratory, Sekisui Plastics Co., Ltd., 670, Morimoto-cho, Tenri-shi, Nara 632

*Research Center for Advanced Science Technology, The University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153

**Department of Industrial Chemistry, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

[Received September 16, 1993; Accepted January 27, 1994]

This paper reports the results of work on PZT/polymer 1-3 connectivity composites for solid ultrasonic applications, especially for AE transducers, in non-destructive inspection. A high sensitivity AE transducer employing PZT/polymer 1-3 composite was developed. Type 1-3 composite was fabricated using a "cutting and filling" technique: a poled PZT disk was cut into a large number of small rods. The inter rods spaces were then filled with polyurethane. For the evaluation of piezoelectric characteristics, composites with 40 vol% PZT were made with values of g_{33} four times large than the solid PZT values. The AE transducer had a higher sensitivity than a conventional type AE transducer.

Key-words: Piezoelectric composite, AE transducer, Resonance, 1-3 connectivity structure

1. 緒 言

材料の破壊に伴う弾性波放出である AE (Acoustic Emission) を検出する変換子は、非破壊検査技術において最も重要なセンサーの一つである。その変換子には、圧電振動型、静電容量型^{1,2)}及び光学型^{3,4)}等があるが、通常圧電振動型の変換子が多く使用され、その圧電体にはチタン酸ジルコン酸鉛 ($\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$, 通常, PZT と称す) が用いられている。これは、PZT が、①感度、②周波数特性、③再現性、④取り扱いやすさ、⑤価格の点では他の材料より優れているためである。

圧電 AE 変換子の検出原理は、図 1 (A) に示すように、AE 波 (弾性波) の伝搬媒体から圧電素子に弾性波が透過することで圧電素子内に変位が生じ、その圧電効果により電圧が生じる⁵⁾。

円柱型圧電素子の場合、図 1 (B) に示すように、その振動モードには厚み振動モード (圧電縦効果) と径振動モード (圧電横効果) があり、圧電縦効果では分極軸 P に平行方向の振動 (変位) に対応する圧電定数 g_{33} が、圧電横効果では分極軸に垂直な方向の振動 (変位) に対応する圧電定数 g_{31} が出力電圧に関係する。例えば、AE 波の縦波 (体積膨張) が震央から単軸応力として圧電体内に透過し

Fig. 1. Transducer structure (A) and transfer system (B). P shows polarization direction. L and T show longitudinal vibration and transverse vibration, respectively.

た場合、圧電体には厚み振動モードと径振動モードが起こる。そのため、両方のモードに関する g_{31} と g_{33} の圧電定数の関係の検討が AE 変換子の高感度化に重要である。

一方、圧電特性のうち棒の縦厚み効果が有効的に利用でき、圧電定数が大きく、かつ圧電特性が自由に設計できる 1-3 連結複合構造が開発されており、ハイドロホンや医用超音波探触子等に応用⁶⁾が進められている。そこで、本論文では、1-3 連結複合体の g_{33} が大きいという特性⁷⁾を利用して、これを「高感度化」AE 変換子として応用するため、超音波加工によって分極処理済み PZT ディスクに溝入れ加工を行い、その加工溝にウレタンゴムを充填して 1-3 連結複合体を製造し、1-3 連結構造における圧電特性及び AE 特性を検討することを目的とする。

2. 1-3 連結複合体 AE 変換子の基礎理論

2.1 1-3 連結複合体の基礎圧電特性評価

圧電素子において g_{33} の向上のために、Newnham⁸⁾らは、Connectivity という複合概念を導入した。この理論によると 1-3 連結構造は、3 次元の高分子材料マトリックスの中に圧電性セラミックスが 1 次元に結合することで、 g_{33} が

大きくなる．その複合体の圧電電荷定数 (d_{33}^*) は、

$$d_{33}^* = (v^C d_{33}^C s_{33}^P + v^P d_{33}^P s_{33}^C) / (v^C s_{33}^P + v^P s_{33}^C) \quad (1)$$

更に、複合体の圧電電圧定数 (g_{33}^*) は、

$$g_{33}^* = d_{33}^* / \epsilon_{33}^* \quad (2)$$

ただし、複合体の固有誘電率 (ϵ_{33}^*) は、

$$\epsilon_{33}^* = v^C \epsilon_{33}^C + v^P \epsilon_{33}^P \quad (3)$$

で表される．ここで、(1)式から(3)式において、右肩の添え字の C, P, 及び*は、それぞれセラミックス相、高分子相、及び複合体を表し、 v , d_{33} , s_{33} , ϵ_{33} は、それぞれ体積占有率、圧電電荷定数、弾性コンプライアンス、及び誘電率を示す．例えば、セラミックス相及び高分子相をそれぞれ PZT 及びウレタンゴムとした複合体の場合、PZT の材料定数が $d_{33}^C = 290 \times 10^{-12}$ C/N, $s_{33}^C = 1.52 \times 10^{-11}$ m²/N, 及び $\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 1050$ とし、ウレタンゴムの材料定数が $d_{33}^P = 0$ pC/N, $s_{33}^P = 5.00 \times 10^{-7}$ m²/N, 及び $\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 3$ とすれば、(2)式より PZT の $v^C = 0.4$ のとき、複合体の理論値は $g_{33}^* = 78 \times 10^{-3}$ Vm/N となる．

図 2 に、ウレタンゴムと PZT による複合体の比誘電率 ϵ_{33}/ϵ_0 、弾性率 c_{33}^* , d_{33}^* 及び g_{33}^* を(1)～(3)式で計算した結果を示す．図 2 (C)は、 d_{33}^* の変化であり、PZT の体積分率が減少してもほとんど変化しない．図 2 (D)は、 g_{33}^* の変化であるが、PZT の体積分率が減少すると g_{33}^* は増大し、PZT の体積分率が50%以下では PZT 単体の数倍の値を示す．

以上より、低弾性率で非圧電性の低誘電率高分子材料と、高弾性率で高誘電率の圧電性セラミックスからなる複合体は、圧電性セラミックスの d_{33} 値を維持したまま、複合体の g_{33} を増大させることができることになる．

Fig. 2. Piezoelectric constants, ϵ/ϵ_0^* (A), c_{33}^* (B), d_{33}^* (C) and g_{33}^* (D), as a function of vol% PZT in PZT/urethane composites with 1-3 connectivity.

2.2 AE 変換子の感度特性

AE 変換子が PZT 単体ならば、その検出電圧 V_t は、厚み振動モードの場合、 c_{33}^E を電界一定のときの弾性率、入射波の変位を u_{33} , n を反射係数とすれば、

$$V_t = g_{33} c_{33}^E n u_{33} \quad (4)$$

で近似できる⁹⁾．

ここで、AE 変換子の感度校正を行うために、疑似 AE 源としてペンシル圧折音源を用いた場合、伝搬媒体の中で音源から検出点までの距離 r における変位 u_r は、 F を音源の大きさ(N), ρ を密度(kg/m³), V_p (m/s) を縦波の音速とし、縦波の伝搬方向と検出方向が同じ場合(震央)、以下の式で表される¹⁰⁾．

$$u_r = F / (4\pi\rho V_p^2) (1/r) \quad (5)$$

ここで、疑似音源に0.5 mm/2H ペンシルしんの圧折を用いたとき $F = 5$ N であり、(5)式より、スチールブロック媒体において $r = 60$ mm における u_r は、 21.7×10^{-12} m となる．また、(4)式の u_{33} は、 u_r の圧電素子への透過率によって決まり、伝搬媒体の音響インピーダンスを Z_1 、圧電素子の音響インピーダンスを Z_2 とすれば、0°入射時の u_{33} は、以下の式で求められる¹¹⁾．

$$u_{33} = u_r \cdot 2Z_1 / (Z_1 + Z_2) \quad (6)$$

ここで、 $Z_1 = 4.89 \times 10^7$ kg/m² s, 及び $Z_2 = 2.66 \times 10^7$ kg/m² s とすれば、(5)式より求めた $u_r = 21.7 \times 10^{-12}$ m を代入すると、圧電素子への入射波の変位 u_{33} は 28.2×10^{-12} m となる．ただし、これは圧電素子の弾性率 c_{33}^E が一定の場合である．したがって、複合圧電素子の弾性率 c_{33}^* が変化すると、入力変位は同一でも伝搬変位は異なるはずである．

3. 実験

実験は、1-3 構造の共振特性を調べるために 3 種類の変換子を試作し、圧電測定及び疑似 AE による検出電圧測定を行った．試作変換子は、図 3 (A)に示すように圧電体を円板状に加工した円板変換子、図 3 (B)に示す圧電体を複数の棒状の圧電ロッドに加工して同一方向に縦に並べたくし形変換子、更に図 3 (C)に示すその各圧電ロッド間に高分子を充填した 1-3 変換子である．

3.1 変換子の試作

圧電素子は、直径10 mm で厚み 6 mm の円板状 PZT (分極済み, HC-50GS, 本多電子製) を加工することで 3 種類の変換子を試作した．加工前の PZT の基本特性は表 1 に示す．

(1) 円板変換子

円板変換子は、厚み 4 mm に研磨した円板状 PZT の両面に電極として銀ペースト (デグサ製, DEMETRON 6290-0275) を塗布し、120°C で30分硬化後、両面に受波板用の直径10 mm, 厚み0.2 mm のアルミナ薄円板 (三菱マテリアル製) を2液性エポキシ系接着剤で接着して作製した．

(2) くし形変換子

くし形変換子は、円板状 PZT を超音波加工機 (日本電

子工業製, UM5000-DA) で鋼鉄製工具により溝入れ加工をし, 厚み 2 mm の PZT 底板上に高さ 4 mm で幅 1

Fig. 3. A schematic picture of AE transducer. (A) disk-type, (B) comb-type and (C) 1-3 type.

Table 1. Basic Characteristics of PZT HC-50GS

Electro-mechanical coupling			
coefficient	k_p (%)		60
	k_{31} (%)		32
	k_{33} (%)		67
Piezoelectric constant			
	d_{31} (pC/N)		110
	d_{33} (pC/N)		290
	g_{31} (10^{-3} Vm/N)		10.5
	g_{33} (10^{-3} Vm/N)		32.0
Relative dielectric constant			
	ϵ_{33}/ϵ_0 (-)		1050
Young's modulus			
	c_{11}^E (10^{10} N/m ²)		8.3
	c_{33}^E (10^{10} N/m ²)		6.6
Elastic compliance			
	$s_{11}^E \times 10^{-11}$ (m ² /N)		1.20
	$s_{33}^E \times 10^{-11}$ (m ² /N)		1.52
Dissipation factor at 1kHz			
	$\tan \delta$ (-)		0.005
Mechanical quality	Q_m (-)		1000
Density	ρ (kg/m ³)		7580
Frequency constant			
	Nd (Hzm)		2200
	Nt (Hzm)		1400
Poisson's ratio	σ (-)		0.32

mm の PZT ロッドを 0.5 mm の間隔で 32 本整列した構造とした。次に, PZT ロッドの端面とアルミナ薄円板を銀ペーストで接着し, 残った厚み 2 mm の PZT の底板を研磨で除去した後, PZT ロッドのもう一方の端面とアルミナ薄円板を銀ペーストで接着した。したがって, 各圧電ロッドは, 銀ペーストの電極で電氣的に並列に結合している。

(3) 1-3 変換子

1-3 変換子は, くし形変換子と同様な PZT の溝入れ加工後, 溝に液状ウレタン樹脂 (サンキュレジン製, SU2153-9) を充填し, 60°C, 5 時間で硬化させ, 残った厚み 2 mm の PZT の底を研磨で除去した。このときの PZT の体積分率は 40% である。この複合体の両面に銀ペーストを塗布し, 両面に受波板用のアルミナ円板を接着剤で接着することで, 直径 10 mm で厚み 4 mm の円板状のウレタンマトリックス中に高さ 4 mm で幅 1 mm の PZT ロッドが 32 本整列した構造の複合体を作製した。したがって, この場合も各圧電ロッドは, 銀ペーストの電極で電氣的に並列に結合している。

3.2 圧電特性

各種試作変換子の圧電定数は, インピーダンスアナライザ (YHP 製, 4194A) を用いて AC2 端子法で行い, 共振-反共振法で求めた¹²⁾。ただし, 誘電率は 1 kHz 時であり, これは, 厚み振動モードの共振点よりも十分低い周波数である。

3.3 AE 検出特性

AE 検出特性の評価は, ペンシルしん圧折による疑似 AE 源を用い, 伝搬媒体としてスチールブロック (長さ 400 mm, 幅 400 mm, 厚み 60 mm) を用い, 検出電圧及び初動ピークの立ち上がり時間を評価した。

(1) 震央における疑似 AE 源

シャープペンシルしんには 0.5 mm/2H (ペンテル製, HIPOLYMER C205) を用い, しんを 5 mm の長さで 45° の角度で圧折した。この AE 源は, Knopoff により有限平面で理論的にステップ応答関数であることが証明されている¹⁰⁾。

(2) 波形収録

試作変換子からの波形の収録は, 1 m の同軸ケーブルを介してデジタルストレージオシロスコープ (岩崎通信機製, DS-6121) で行った。測定装置の概要を図 4 に示す。

Fig. 4. Schematic diagram of the apparatus to measure artificial AE.

4. 実験結果

4.1 試作変換子の圧電特性

図5に試作変換子におけるインピーダンス特性を示す。図5(A)の円板変換子では、215 kHzには径方向共振、512 kHzはその高調波であり、310 kHzには厚み縦共振、905 kHzはその高調波が見られた。また、図5(B)のくし形変換子では、共振ピークが割れる共振分割が厚み縦共振の295 kHzに見られた。更に、2 MHz付近にも各圧電ロッドの幅方向の共振が見られた。更に、図5(C)の1-3変換子では、345 kHzに厚み縦共振が見られ、図5(B)で見られた各圧電ロッドの幅に対する共振は見られなかった。

表2に試作変換子の圧電特性をまとめて示す。1-3変換子の g_{33} は、円板変換子の4.8倍の値を示した。

4.2 試作変換子のAE検出特性

図6に、震央より入力した疑似AEの検出波形を示す。初動ピークの検出波形では、図6(A)の円板変換子は100 mV、図6(B)のくし形変換子は170 mV、図6(C)の1-3変換子は200 mVで、各々円板変換子の1.7倍、2倍となった。リングング特性では、円板変換子では、ピーク後にリングングが見られたが、くし形変換子では、リングングが減少し到達第1波(図中Pで示す)とその反射波(図中PPで示す)が認識できた。更に、1-3変換子では、リングング周期が一定になり共振周波数特性が比較的シンプ

ルであった。表3に、同様の条件で測定した市販のAE変換子を加えた試作変換子のAE検出特性をまとめて示す。

Table 2. Piezoelectric Properties of Disk-Type, Comb-Type and 1-3 Type Transducer

transducer	disk-type	comb-type	1-3 type
thickness			
fr (kHz)	310	295	345
fa (kHz)	322	392	430
Nt (Hzm)	1240	1200	1380
ϵ_{33}/ϵ_0 (-)	1050	427	536
kt (%)	29	69	64
d_{33} (pC/N)	111	353	274
g_{33}^{APP} (10^{-3} Vm/N)	12	94	58
c_{33} (10^{10} N/m ²)	6.6	1.4	2.5

Fig. 5. Frequency dependence of impedance in disk-type (A), comb-type (B) and 1-3 type transducer (C).

Fig. 6. Breaking pencil lead signal (artificial AE) detected by disk-type (A), comb-type (B) and 1-3 type transducer (C). P and PP show the arrived and the reflected points of longitudinal wave, respectively.

Table 3. AE Properties of Disk-Type, Comb-Type and 1-3 Type Transducer

transducer	output voltage V _t (mV)	rise time R _t (ns)
disk-type	100	1020
comb-type	170	1140
1-3 type	200	1070
AE-901S	129	2920
PICO	50	1520

AE-901S(NF Co., Ltd.), PICO(PAC Co., Ltd.)

5. 考 察

5.1 共振特性に及ぼす 1-3 連結複合構造の影響

表 2 に、各試作変換子に対して、共振及び反共振周波数と静電容量の測定から、計算で求めた圧電諸定数を示す。ただし、くし形及び 1-3 変換子には、素子の両面に素子と同半径のアルミナ薄円板がついていて、各変換子を同一の断面積で比較した。

表 2 に示した試作変換子の実測値のうち見掛けの g_{33}^{APP} は、円板変換子において $12 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$ と、PZT 素子の g_{33} である $32 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$ (表 1) の 38% に減少しているのに対し、くし形変換子では $94 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$ と PZT 素子の g_{33} の 2.9 倍になり、1-3 変換子では $58 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$ と PZT 素子の g_{33} の 1.8 倍になっている。これは、円板変換子では、厚み/直径が 0.4 のため径方向と厚み方向の共振が結合した結合モードとなり、見掛けの g_{33}^{APP} が減少したのに対し、くし形変換子では、各 PZT ロッドが厚み/幅 = 4 のために、厚み縦共振は幅横共振に影響されず、PZT 素子の g_{33} が検出されていることを示している。

一方、1-3 変換子の見掛けの g_{33}^{APP} は、PZT 素子の g_{33} の 1.8 倍となったが、(2) 式で求めた理論値 g_{33}^* ($78 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$) の 74% であった。また、1-3 変換子における 345 kHz の厚み縦共振は共振分割を起こさず、表 1 の周波数

定数 (N_t) とよい一致を示すことから分極軸に沿った振動をしていることが推察され、これより、1-3 連結複合構造により PZT 素子単体の約 2 倍の g_{33} が得られ、高感度な AE 変換子が期待できることが示された。

5.2 AE 変換子における検出電圧特性

複合体による変換子の場合も、有限媒体である複合体に透過した弾性波により PZT 内部に変位が生じる。

ここで、(5) 及び (6) 式よりペンシル疑似音源の PZT への入射波の変位 u_{33} を $28.2 \times 10^{-12} \text{ m}$ とし、更に、 g_{33} 及び c_{33}^E を図 2 に示した各 PZT 分率に対する複合体の圧電定数 g_{33}^* 及び弾性率 c_{33}^* として代入し、各 PZT 分率に対する複合体検出電圧を (4) 式より求め、図 7 に示した。ただし、エアーバックキングの PZT 端面の反射係数 n を 2 とした。このとき、図 2 に示すように PZT 体積分率が小さくなると、 g_{33}^* は増加するが c_{33}^* は減少するので、図 7 の曲線 (A) に示すように PZT 体積分率が小さくなくても検出電圧は 100 mV とほぼ一定となった。この値は、円板変換子の実測値とほぼ同様であるが、くし形及び 1-3 変換子の実測値と矛盾する。

また、表 2 における測定値を (4) 式に代入して各変換子の出力電圧 V_t を計算すると、円板、くし形及び 1-3 変換子では、それぞれ 44 mV, 74 mV 及び 81 mV となる。この出力電圧の計算値比を円板変換子を 1 とすると、くし形変換子では 1.6、1-3 変換子では 1.8 となり、実測値の比に近くなる。

Newnham 理論⁸⁾では、複合体を構造的均質とし複合圧電体全体の弾性率を下げた効果及び ε_{33} を下げた効果によって g_{33} が大きくなっている。しかし、実際の複合圧電体では、複合体の PZT 分率が変わっても AE 波を受ける

Fig. 7. Normalized output voltage of longitudinal wave for 1-3 type transducer. Lines (A) and (B) show the calculated value of $V_t = g_{33}^* c_{33}^* u_{33}$ and $V_t = g_{33}^* c_{33}^E u_{33}$, respectively. ■, ▲ and ● show the experimental value of disk-type, comb-type and 1-3 type transducer, respectively.

PZT の弾性率は、弾性論における複合則からもほとんど変化しないことから、(4)式における複合体の弾性率 c_{33}^E は、PZT の弾性率 c_{33}^E で一定と考えた方が妥当であろう。すなわち、 $c_{33} \times u_{33} = T$ (応力) の関係において、応力 T が一定で c_{33} が一定ならば、 u_{33} は変化しないと推測できるので、PZT 内を伝搬する音の変位は、各試料とも同一であると考えられる。

そこで、 u_{33} を 28.2×10^{-12} m とし、(4)式に各 PZT 分率に対する複合体の圧電定数 g_{33}^* 及び PZT の弾性率 c_{33}^E を代入して、各 PZT 分率に対する複合体の検出電圧 V_t を求め、図 7 の曲線(B)に示す。同様に、 u_{33} を 28.2×10^{-12} m とし、 g_{33}^* 及び c_{33}^* から求めた検出電圧も曲線(A)として示す。図 7 の曲線(B)によると、PZT 体積分率が小さくなると、検出電圧は増加する。PZT 体積分率が 40%では、検出電圧は 280 mV になり 100%PZT の場合の 1.4 倍であり、円板変換子及び 1-3 変換子の測定値が、この曲線とよい一致を示す。しかし、図 7 の曲線(B)の計算値と測定値の間に生じる差は、変換子の反対側に剛体及び吸音材がないためと推測できる。

以上より、PZT の体積分率が変化しても、PZT の弾性率は変化せず、PZT の体積分率の分だけ誘電率が変化して、見掛けの g_{33} が大きくなり、かつ応力を受ける断面積が小さくなることにより、1-3 変換子では、AE の検出電圧が大きくなることが明らかになった。

6. 結 言

PZT/高分子の 1-3 連結複合体による高感度 AE 変換子を開発するため、円板変換子、くし形変換子及び 1-3 変換子を試作しその特性評価を行った。

(1) 共振・反共振法による圧電特性測定において、円

板変換子では、径方向共振及び厚み縦共振が検出され、くし形変換子では、各ロッドの厚み縦方向の共振が共振分割を起こし各ロッドの幅方向の共振も検出され、1-3 変換子では、厚み縦共振のみ検出され、各ロッドの幅方向共振が抑えられた。

(2) ペンシル圧折疑似 AE の検出特性において、出力電圧の実測値は円板変換子を 1 とすると、くし形変換子では 1.7、1-3 変換子では 2 となった。

(3) 1-3 複合圧電体における AE 波の検出感度の向上は、誘電率の低下により g_{33} が向上し、かつ応力を受ける断面積が小さくなることによることが明らかになった。

文 献

- 1) 大久信広, 岸 輝雄, 第 3 回 AE 総合コンファレンス論文集, 日本非破壊検査協会 (1981) pp. 57-62.
- 2) F. R. Breckenridge and M. Greenspan, *J. Acoust. Soc. Am.*, **69**, 1177-85 (1981).
- 3) R. A. Kline and R. E. Green, *J. Acoust. Soc. Am.*, **64**, 1633-39 (1978).
- 4) D. C. Emmony, M. W. Gogfrey and R. G. White, *J. Acoust. Emission*, **1**, 263-65 (1982).
- 5) 尾上守夫監修, “電気電子のための固体振動論の基礎”, オーム社, 第 1 版 (1982) pp. 115-88.
- 6) W. A. Smith, Proceeding of the 1986 IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, Bethlehem, Pennsylvania, June 8-11 (1986) pp. 249-56.
- 7) D. P. Skinner, R. E. Newnham and L. E. Cross, *Mater. Res. Bull.*, **13**, 599-607 (1978).
- 8) K. A. Klicker, J. V. Biggers and R. E. Newnham, *J. Am. Ceram. Soc.*, **64**, 5-8 (1981).
- 9) 志波光晴, 岸 輝雄, 日本非破壊検査協会 006 特別研究委員会資料, No. 96 (1991) pp. 27-52.
- 10) L. Knopoff, *J. Appl. Phys.*, **29**, 661 (1958).
- 11) 湯山茂徳, 日本非破壊検査協会 006 特別委員会資料, 日本非破壊検査協会, No. 78 (1984) pp. 19-30.
- 12) 電子材料工業会標準規格, EMAS-6001, 電子材料工業会圧電セラミックス技術委員会 (1977).