

# 圧電セラミックス 技術資料

## 目次

1. はじめに	1
2. 圧電セラミックスについて	1
2-1 強誘電性	1
2-2 圧電方程式	3
3. 圧電セラミックスの評価法	6
3-1 共振, 反共振周波数特性の測定	6
3-2 圧電振動子形状と定数	7
3-3 定数の意味と算出式	8
4. 当社圧電セラミックス材料の紹介	10
4-1 各種圧電セラミックス材料基本特性	10
4-2 温度特性, 経時特性	13
4-3 製造プロセス	15
4-4 振動子形状と電極	16
5. 圧電セラミックス材料の応用技術	16
5-1 デバイス設計例	16
(1) 圧電アクチュエータ	17
(2) 圧電ブザー、圧電サウダ	20
(3) 超音波モータ	22
(4) AE センサ	23
(5) 加速度センサ	24
(6) ソナー	25
(7) セラミック・フィルタ	26
5-2 素材選定のポイント	28
6. 用語の説明	29
7. 参考文献	30

## 1. はじめに

半導体ICやコンピュータ技術のめざましい進展は、家電、OAおよび通信などのエレクトロニクス産業分野で大きな需要を喚起してきました。また、オプト(光)、メカトロ(機械)などの周辺の技術も統合し、これまでにない新しい用途が創造されています。この発展の一翼を担っている材料の一つに、圧電セラミックスがあります。これは電気から機械(機械から電気)への変換素子としての機能を持つもので、代表的な応用製品として各種センサーや圧電ブザーが、テレビ、パソコン、自動車などの身近な機器に沢山使われています。微小な機械振動を検出するためのセンサーやナノメータオーダの位置制御を行うアクチュエータに圧電セラミックスを用いたものが開発されており、マイクロエレクトロニクスの領域でも無くてはならない材料になっています。

この資料は、圧電セラミックスに関する基礎知識とデバイス設計のために必要なデータベースをまとめたもので、素材の物理的性質、当社材質系列の特性データおよび、応用例についてまとめてあります。

## 2. 圧電セラミックスについて

### 2-1 強誘電性

実用的な圧電セラミックスの多くは、一般組成式が $ABO_3$ で書き表されるペロブスカイト型結晶構造をしている強誘電体です(Fig.1)。代表的なものとして、チタン酸バリウム( $BaTiO_3$ )、チタン酸鉛( $PbTiO_3$ )、チタン酸ジルコン酸鉛( $Pb(Zr, Ti)O_3$ )<sup>(注1)</sup>、さらに $Pb(Zr, Ti)O_3$ に少量のLaを添加して得られるチタン酸ジルコン酸ランタン鉛( $(Pb, La)(Zr, Ti)O_3$ )などがあげられます。この結晶はキュリー点以上(常誘電相)においては立方格子を形成し、Aイオンは頂点に、酸素イオンは面心に、Bイオンは体心にある構造をしています。また、キュリー点以下(強誘電相)では、正方格子を形成し、Bイオンが酸素イオンのいずれかに接近した位置をしめ、Bイオンの変位により双極子能率を生じ、自発分極の主な原因となる構造をしています。ここで、 $BaTiO_3$ 、および $PbTiO_3$ 、の強誘電的正方格子におけるBイオンの自発変位をFig.2に示します。

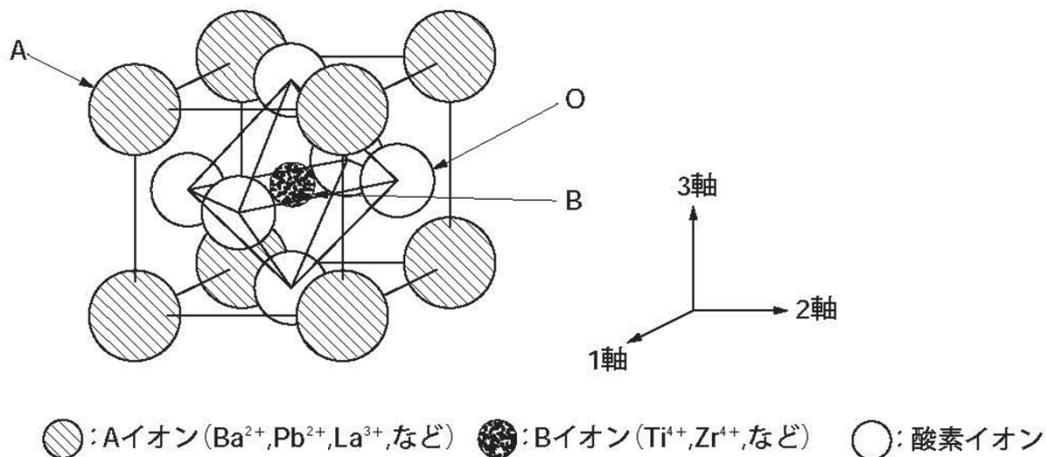


Fig.1 ペロブスカイト型結晶構造

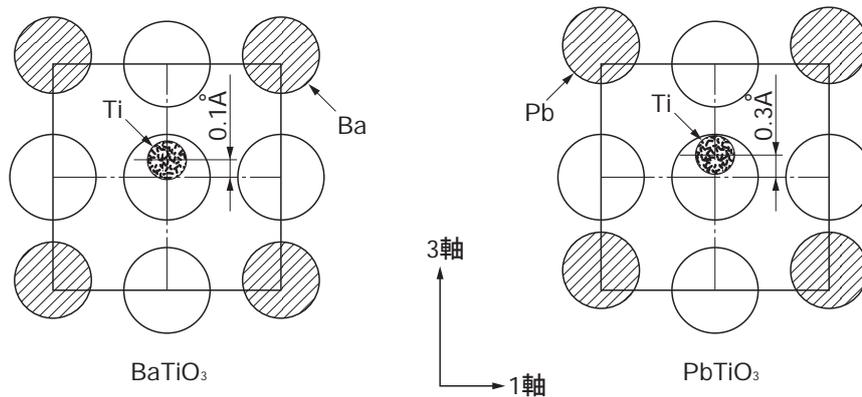


Fig.2 強誘電的正方格子における自発イオン変位

圧電体として用いられるセラミックスは、上述した組成をもつ強誘電体微結晶の集合体で一般に1~5 μm程度の結晶粒 (grain) から構成されています。このような結晶体における自発分極の方向は、各結晶粒ごと自然発生的にあらゆる方向を向いています (Fig.3-a)。

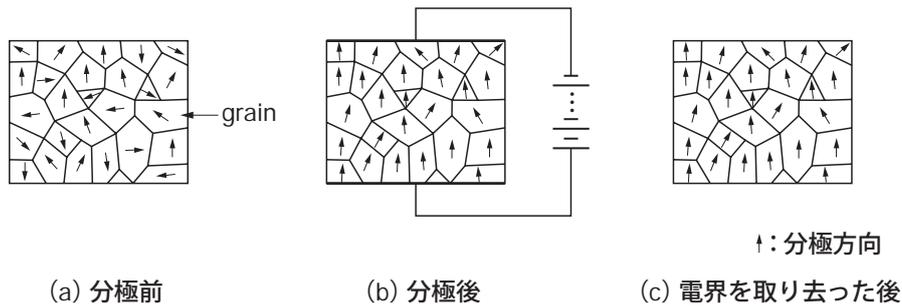


Fig.3 圧電セラミックス内部の自発分極

この状態では、外部から微小電界を加えても各結晶粒ごとの圧電効果が相互に打ち消し合いセラミックスとしては歪の発生すなわち正圧電効果は現れません。したがって、圧電性を持たせるためには、このような強誘電体セラミックスに強い直流電界 (数KV/mm) を加えて、自発分極の方向をそろえてやらなければなりません (Fig.3-b)。この操作を分極 (poling)<sup>(注2)</sup> といい自発分極方向の総和を分極軸方向といいます。このようにして、分極された強誘電体セラミックスは、電界を取り除いてもこの状態は、ほぼそのまま保たれます。このような分極後のセラミックスに微小電界を加えると、各結晶粒ごとの圧電性は、相殺されることなく全体の歪みが生じ、圧電体としての機能が保持されたことになります。また、強誘電体セラミックスに交流電界を加えると分極P<sup>(注2)</sup> と電界Eとの間には、Fig.4に示すようなヒステリシス曲線を描くことになります。すなわち、一度電界を印加したものは、電界を取り去っても元の状態にはもどらず、残留分極Prが残る事になります。この残留分極を打ち消すためには、さらに逆向きの電界が必要となり、これに必要な電界を抗電界Ecと呼び

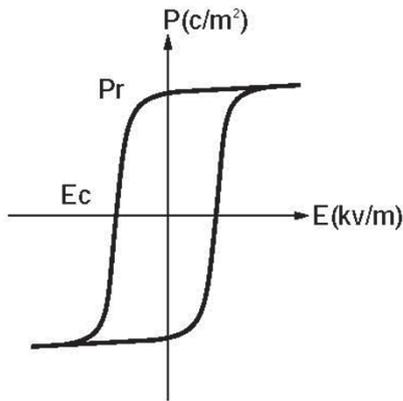


Fig.4 強誘電体のヒステリシス曲線

ます。このように圧電効果を利用する目的で強誘電体セラミックスを分極したものを圧電セラミックスといいます。

では、このような結晶構造を持つセラミックスがいかんして圧電効果を示すのか、そのメカニズムについて正圧電効果の場合を例に取り上げ説明を行います。

分極された圧電セラミックスFig.5-aにその時の単位胞当たりの結晶構造をFig.5-bに示します。

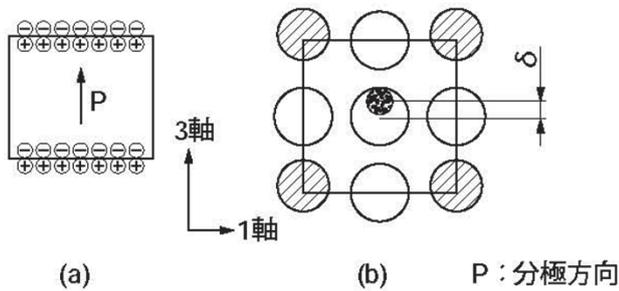


Fig.5

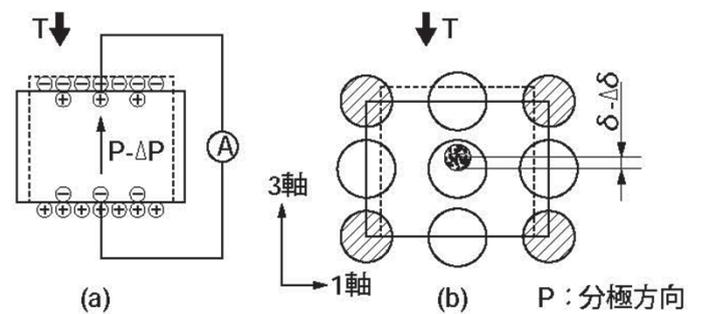


Fig.6

強誘電相では、Bイオンは3軸方向に $\delta$ 変位しているため、自発分極 $P$ を生じ、そのためBイオン変位側の表面層には、正電荷がそれとは反対側には負電荷が過剰に存在します。したがって、この電荷を中和するために、空気中の浮遊電荷などと結びつきます。この結晶に3軸と平行に応力 $T$ を加えると1軸は伸び3軸は縮む結果となり(Fig.6-a, b)、Bイオンは3軸の負の方向へ $\Delta\delta$ 移動することになります。よって、自発分極は、 $\Delta\delta$ に見合った自発分極 $\Delta P$ が減少することになり、この $\Delta P$ に比例した電荷が表面から消えることになります。その結果、表面の電荷と対になっていた浮遊電荷があまることになり、そこでFig.6-aのような接続をすると、導線を伝わり $\Delta P$ に対応していた浮遊電荷が流れることになるわけです。反対に、圧力を取り去ると自発分極は、もとの状態にもどるため $\Delta P$ に対応する電荷が前とは逆向きに流れることになります。これを正圧電効果といいます。

## 2-2 圧電方程式

圧電体に加えた応力 $T$ および電界 $E$ は、その結果生じた電気変位 $D$ および歪 $S$ との関係において、圧電方程式にて書き表されます。そこで、この項目では、圧電方程式の基礎的概念についての説明を行います。

圧電体に応力 $T$ が加わると、応力と一次関係にある歪 $S$ の間には、 $T=c \cdot S$ ( $c$ はスティフネス)あるいは、 $S=s \cdot T$ ( $s$ はコンプライアンス)の関係が成り立ちます。さらに、32結晶群<sup>(注3)</sup>の内12結晶群

は、応力によって、歪を生ずるだけですが残り20結晶群の内、導体でないものでは歪の他に、電気分極Pをも生じ、これが圧電性の直接的な原因となっています。この圧電的な現象を正圧電効果といい、PとTの間には $P=dT$  ( $d$ は、圧電歪定数)の関係が成立します。また、分極Pは電界 $E=0$ の時でも生じているため、この時の電気変位Dに等しく、DとTの間には、 $D=dT$ の関係が成り立つこととなります。次に、物質の電極間に電界Eを加えると物質には歪Sが生じます。これを、逆圧電効果といい、EとSの間には、 $S=dE$ の関係が成立します。一方、誘導体として見た場合、電界Eと電気変位Dとの間には $D=\epsilon E$  ( $\epsilon$ は、誘電率)の関係が成立する結果となり、圧電セラミックスにおいては、これらの関係を次式で表すことができます。

$$\begin{cases} S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m & \dots\dots (d\text{形式}) \\ D_n = d_{nj} T_j + \epsilon_{nm} E_m \end{cases}$$

( $m, n=1, 2, 3$   $i, j=1, 2, 3, 4, 5, 6$ : テンソル表示)

この表現式を圧電方程式といい、2つの式が圧電 $d$ 定数を介して結合していることから、圧電定数の $d$ をとって、 $d$ 形式と呼びます。右肩に添字のついているものは、添字の変数が固定されているときの値を示しています。例えば、 $s_{ij}^E$ の場合 $E=0$ 時におけるコンプライアンスの値であることを意味します。このほかに、独立変数と従属変数の選び方で、 $e, g, h$ 形式で表すこともできます。

$$\begin{cases} T_i = c_{ij}^E S_j - e_{mi} E_m & \dots\dots (e\text{形式}) \\ D_n = e_{nj} S_j + \epsilon_{nm} E_m \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_i = s_{ij}^D T_j + g_{mi} D_m & \dots\dots (g\text{形式}) \\ E_n = -g_{nj} T_j + \beta_{nm} D_m \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_i = c_{ij}^D S_j + h_{mi} D_m & \dots\dots (h\text{形式}) \\ E_n = -h_{nj} S_j + \beta_{nm} D_m \end{cases}$$

ここで、 $g$ は圧電出力定数、 $e, h$ は圧電応力定数、 $\beta$ は、逆誘電率を意味します。

圧電セラミックスは、分極処理を施すことによってはじめて圧電性が生じるわけで、分極処理をしたセラミックスは、分極方向と他の方向とは性質が異なり、材料定数はテンソルで表さなければなりません。そこで、 $d$ 形式を例にとってみると、電気変位Dは、 $D_1 \sim D_3$ の成分からなる一階のテンソルで表され、応力Tは $T_1 \sim T_6$ の2階のテンソルで表されることから、両者を関係づける $d$ 定数は、3階のテンソル $d_{nj}$  ( $n=1 \sim 3, j=1 \sim 6$ )となります。同様に歪みSは、2階のテンソル( $S_1 \sim S_6$ )で、応力も2階のテンソルであることから両者を関係づけるコンプライアンス $s^E$ は、4階のテンソル( $s_{ij}^E, i=1 \sim 6, j=1 \sim 6$ )ということになります。以下説明は、省略しますが各定数とも同様な意味を持ちます。また、圧電セラミックスでは、結晶の対称性を考慮した場合、ある定数は0になり、また、ある定数は他の定数と等しくなるため、非常に簡単になります。そこで独立な変数は減る結果となり、0でない独立な係数を、各圧電方程式( $d, e, g, h$ 形式)ごとに列記すると次のようになります。

- d形式・・・ $S_{11}^E, S_{12}^E, S_{13}^E, S_{33}^E, S_{44}^E, d_{31}, d_{33}, d_{15}, \epsilon_{11}^T, \epsilon_{33}^T$
- e形式・・・ $C_{11}^E, C_{12}^E, C_{13}^E, C_{33}^E, C_{44}^E, e_{31}, e_{33}, e_{15}, \epsilon_{11}^S, \epsilon_{33}^S$
- g形式・・・ $S_{11}^D, S_{12}^D, S_{13}^D, S_{33}^D, S_{44}^D, g_{31}, g_{33}, g_{15}, \beta_{11}^T, \beta_{33}^T$
- h形式・・・ $C_{11}^D, C_{12}^D, C_{13}^D, C_{33}^D, C_{44}^D, h_{31}, h_{33}, h_{15}, \beta_{11}^T, \beta_{33}^T$

では、ここで上記圧電方程式を用いて具体的な現象論における解き方の例を示します。3軸方向に分極された円柱状圧電体(Fig.7)に分極軸と平行に励振電界を加えたとします。この圧電体の円柱状縦振動モードの条件では、応力 $T$ および電気変位 $D$ は $T_1=T_2=0, T_3 \neq 0, D_1=D_2=0, D_3 \neq 0, \partial D_3/\partial Z=0$ となるので、圧電方程式は、次のようになります。

$$\begin{cases} S_3=S_{33}^D T_3+g_{33} D_3 & \dots\dots ① \\ E_3=-g_{33} T_3+\beta_{33}^T D_3 \end{cases}$$

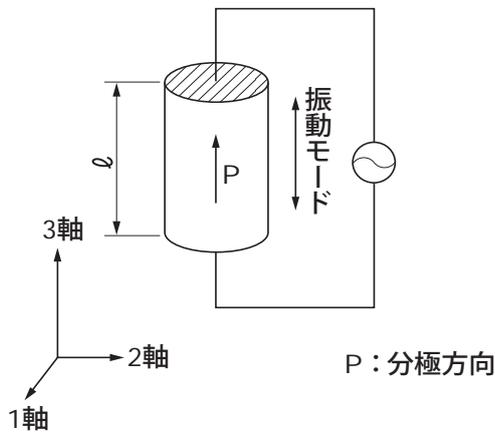


Fig.7 円柱状圧電セラミックス

圧電体の任意の点の3軸方向への変位を $\xi(z, t)$ とすると、 $S_3=\partial \xi/\partial z$ となります。また、圧電体の微小体積 $dx dy dz$ を考えると、この部分に働く力は $(\partial T_3/\partial z) dx dy dz$ となり、運動方程式は次のように書き表されます。

$$\rho \cdot dx dy dz \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial T_3}{\partial z} dx dy dz \quad (\text{ただし } \rho \text{ は密度})$$

今、 $\partial D_3/\partial z=0$ であるから、①式より $\partial S_3/\partial z=S_{33}^D \cdot \partial T_3/\partial z$ となり、よって運動方程式は次式で表されます。

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho S_{33}^D} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} \quad \dots\dots ②$$

電圧の変化による電気変位の変化を $D_3=D^0 \cdot e^{j\omega t}$ とすると、②の一般解は次のようになります。

$$\xi(z, t) = \left\{ A \cdot \sin\left(\frac{\omega}{V} z\right) + B \cdot \cos\left(\frac{\omega}{V} z\right) \right\} e^{j\omega t}$$

ここで、 $V = 1 / \sqrt{\rho \cdot s_{33}^D}$  であることから、 $S_3 = \partial \xi / \partial z$  を用いて、これを①式に代入すると境界条件  $Z=0, \ell, T_3=0$  より積分定数  $A, B$  を求めると変位  $\xi(z, t)$  は以下のように求められます。

$$\xi(z, t) = \frac{vg_{33}^D}{\omega} \left\{ \sin\left(\frac{\omega}{V} z\right) - \tan\left(\frac{\omega \ell}{2V}\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega}{V} \cdot Z\right) \right\} e^{j\omega t}$$

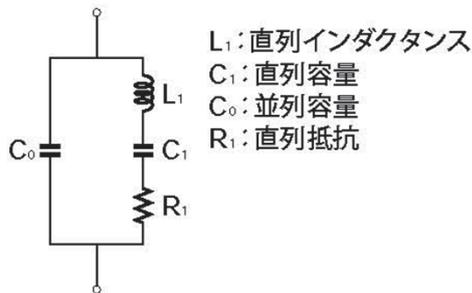
したがって、 $\omega$  が  $\omega r \cdot \ell / 2V = \pi / 2$  となる、 $\omega r$  に対応する周波数  $\omega r / (2 \cdot \pi)$ 、 $(=V / (2 \cdot \ell))$  で変位  $\xi$  が  $\infty$  となる所で共振することになります。すなわち、共振周波数は  $1 / (2 \cdot \ell \sqrt{\rho \cdot s_{33}^D})$  と書き表せます。

### 3. 圧電セラミックスの評価法

#### 3-1 共振, 反共振周波数特性の測定

共振, 反共振周波数の測定は従来、動アドミタンスから求める定電流回路・定電圧回路<sup>(注4)</sup>が用いられてきました。現在では、精密な測定が行えるようになりました。そこで、ここでは複素インピーダンス測定回路による精密測定法についての説明を行います。

圧電セラミックス振動子は、その振動モードの圧電方程式を解くことにより等価回路で表すことができます。(Fig.8)。等価回路における共振・反共振周波数は直列共振周波数( $f_s$ )、並列共振周波数( $f_p$ )と呼ばれ、次式で表されます。



$$\begin{cases} f_s = 1 / \{ 2 \cdot \pi \sqrt{L_1 C_1} \} \\ f_p = 1 / \{ 2 \cdot \pi \sqrt{L_1 C_0 C_1 / (C_1 + C_0)} \} \end{cases}$$

$f_s \cdot f_p$  の測定回路を Fig.9 に示し、測定の結果得られる圧電セラミックス振動子のインピーダンス特性を Fig.10 に示します。

Fig.8 圧電セラミックス振動子の等価回路

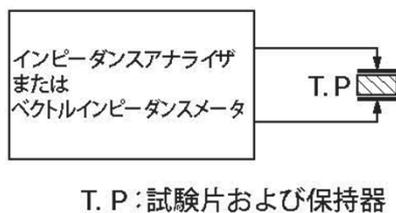


Fig.9 複素インピーダンス測定回路

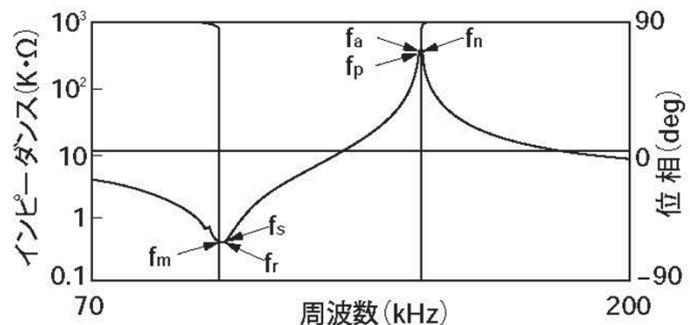


Fig.10 圧電セラミックスのインピーダンス特性

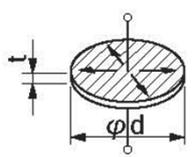
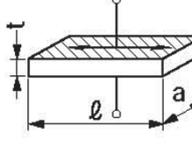
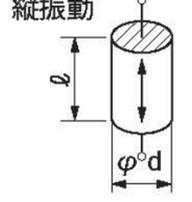
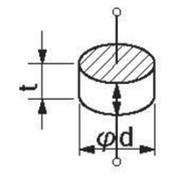
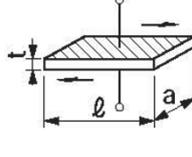
実際の測定は、この  $f_s$  および  $f_p$  を直接測定するのは難しく、近似的に共振周波数  $f_r$  (位相が  $0^\circ$  となる周波数で低い方の周波数) 反共振周波数  $f_a$  (位相が  $0^\circ$  となる周波数で高い方の周波数) あるいは、インピーダンスが最小、インピーダンスが最大となる周波数  $f_m, f_n$  の測定を行います。

### 3-2 圧電振動子形状と定数

圧電セラミックス振動子の特性評価用試験片はそれぞれ単一な振動モードが得られる寸法とし、材料定数が変動しない寸法範囲を基本的な条件として設定します。

Fig.11に試験片の形状および試験片の条件、さらに各振動モードから得られる材料定数記号を示します。

Fig.11 試験片の形状と、各振動モードから得られる材料定数記号

試験片形状 および 振動モード	試験片 条件	材 料 定 数				
		周波数 定数	電気機械 結合係数	圧電定数	比誘電率	弾性定数
径方向振動  $d/t \geq 15$ $t = 1.0$ $\phi d = 15$		Nr	Kr	$d_{31}$	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$	$S_{11}^E$ $S_{12}^E$ $S_{66}^E$ $Y_{11}^E$
長辺方向伸び振動  $l/a \geq 4$ $a/t \geq 3$ $l \geq 12$ $t = 1.0$ $l = 12$ $a = 3$		$N_{31}$	$K_{31}$	$d_{31}$ $g_{31}$	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$	$S_{11}^E$ $Y_{11}^E$
縦振動  $l/d > 2.5$ $l = 15$ $\phi d = 6$		$N_{33}$	$K_{33}$	$d_{33}$ $g_{33}$	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$	$S_{33}^D$ $S_{33}^E$ $Y_{33}^E$
厚み縦振動  $d/t \geq 10$ $t = 1.0$ $\phi d = 10$		Nt	Kt	—	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$	$C_{33}^D$ $C_{33}^E$ $Y_{33}^E$
厚みすべり振動  $l > a > t$ $l/t > 32$ $t = 0.25$ $l = 10.0$ $a = 2.5$		$N_{15}$	$K_{15}$	$d_{15}$ $g_{15}$	$\frac{\epsilon_{11}^T}{\epsilon_0}$	$C_{44}^D$ $C_{44}^E$ $S_{44}^E$ $Y_{44}^E$

ただし、・P:分極方向・↑:変位方向・⊙:実験片支持位置・斜線部:駆動用電極・寸法単位:mm

### 3-3 定数の意味と算出式

#### (1) 電気機械結合係数 K (%)

圧電体の電極間に加えた電気エネルギーを機械的エネルギーに変換する効率を表す定数で、材料の圧電的な活性の尺度を表します。結晶の単位体積当たりの弾性エネルギーを $U_m$ 、電気エネルギーを $U_e$ 、圧電エネルギーを $U_{em}$ とすると電気機械結合係数 $K$ は $K = \sqrt{U_{em}^2 / U_m U_e}$ で定義されます。また、圧電振動子の各振動モードにおける電気機械結合係数は次式により求められます。

- a) 円板状振動子の径方向振動(近似式)  $\frac{1}{K_1^2} = 0.395 \times \frac{fr}{fa-fr} + 0.574$
- b) 矩形板振動子の長辺方向伸び振動  $\frac{K_{31}^2}{1 - K_{31}^2} = -\frac{\pi}{2} \frac{fa}{fr} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{fa}{fr}\right)$
- c) 円柱状振動子の縦振動  $K_{33}^2 = \frac{\pi}{2} \frac{fr}{fa} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{fr}{fa}\right)$
- d) 円板状振動子の厚み縦振動  $K_t^2 = \frac{\pi}{2} \frac{fr}{fa} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{fr}{fa}\right)$
- e) 矩形板状振動子の厚みすべり振動  $K_{15}^2 = \frac{\pi}{2} \frac{fr}{fa} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{fr}{fa}\right)$

#### (2) 圧電定数

##### a) 圧電d定数 d (m/V)

圧電歪定数とも呼ばれ、応力0の状態では電圧を印加した時に生ずる歪の大きさを表し、 $d = K \cdot \sqrt{\varepsilon^T \cdot s^E}$ で定義されます。また、各振動モードによる圧電d定数は次式により求められます。

$$d_{31} = K_{31} \sqrt{\varepsilon_{33}^T \cdot s_{11}^E}, d_{33} = K_{33} \sqrt{\varepsilon_{33}^T \cdot s_{33}^E}, d_{15} = K_{15} \sqrt{\varepsilon_{11}^T \cdot s_{44}^E}$$

ただし、K：電気機械結合係数、 $\varepsilon^T$ ：誘電率、 $s^E$ ：コンプライアンス

##### b) 圧電g定数 g (v.m/N)

圧電出力定数とも呼ばれ、電気変位0の状態では圧力を加えた時に生ずる電圧の大きさを表し、 $g = d / \varepsilon^T$ で定義されます。また、各振動モードによる圧電g定数は、次式により求められます。

$$g_{31} = d_{31} / \varepsilon_{33}^T, g_{33} = d_{33} / \varepsilon_{33}^T, g_{15} = d_{15} / \varepsilon_{11}^T$$

ただし、d：圧電d定数、 $\varepsilon^T$ ：誘電率

##### c) 圧電e定数 e (c/m<sup>2</sup>)

圧電応力定数とも呼ばれ、圧電体に歪みを生じないように束縛した状態で、圧電体に電界を加えた時に発生する応力を表し、 $e = d / s^E$ で定義されます。ただし、d：圧電d定数、 $s^E$ ：コンプライアンス

##### d) 圧電h定数 h (v/m)

圧電e定数と同様、圧電応力定数と呼ばれ、圧電体に電圧が生じないように束縛された状態で、圧電体に電気変位を加えた時に発生する応力を表し、 $h = g / s^D$ で定義されます。

ただし、g：圧電g定数、 $s^D$ ：コンプライアンス

### (3) 機械的品質係数 $Q_m$

圧電体が固有振動を起こした時の共振周波数付近における機械的な振動の鋭さを示す定数で圧電セラミックスの材料特性を規定する時に使われます。 $Q_m$ 値が300以上のものを低損失材料、すなわちhigh Q材、300未満のものをlow Q材と呼びます。また、圧電体に応力を加えたとき歪に位相ずれ $\delta_m$ が起こり、弾性損失 $\tan \delta_m$ を生じる結果となり、その尺度として $Q_m$ が用いられ、 $\tan \delta_m = 1/Q_m$ として定義されます。圧電振動子の $Q_m$ は次式より求められます。

$$Q_m = 1/[2\pi f_r \cdot R_1 \cdot C_f \{1 - (f_r/f_a)^2\}]$$

ただし、 $R_1$ ：共振周波数 $f_r$ に対応するインピーダンス、 $C_f$ ：周波数1kHzにおける試料の自由容量

### (4) 周波数定数 $N$ (Hz・m)

圧電振動子の共振時には、波長 $\lambda$ と試料の伝播方向の長さ $\ell$ との間に $\lambda = 2\ell$ の関係があり、さらに、伝播速度 $v$ と共振周波数 $f_r$ との間には、 $v = f_r \cdot \lambda$ の関係があることから周波数定数 $N$ は $N = f_r \cdot \ell = f_r \cdot \lambda/2 = v/2$ として表されます。このように、周波数定数は伝播速度の1/2の値をしており、半波長共振の寸法あるいは共振周波数を決定するのに用いられます。各振動モードによる周波数定数は次式により求められます。

$$N_r = f_r \cdot d, N_{31} = f_r \cdot \ell, N_{33} = f_r \cdot \ell, N_t = f_r \cdot t, N_{15} = f_r \cdot t$$

ただし、 $d, t, \ell$ ：振動モードの方向の試料の長さ

### (5) キュリー点 $T_c$ (°C)

圧電体の温度を上昇させていくと、強誘電相から自発分極が消失し、常誘電相になります。その時の温度をキュリー点と呼び、圧電性が消失する臨界温度のことを指します。一旦キュリー点を超えたものを使うには、再度分極を行わなければ圧電性は示しません。

### (6) 比誘電率 $\epsilon^T/\epsilon_0$

誘電率とは、電界 $E$ と電束密度 $D$ との線形関数を表す物質定数で、誘電率を $\epsilon^T$ とすると $\epsilon^T = D/E$ で定義され、 $\epsilon^T$ を真空中の誘導率 $\epsilon_0$ ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m)で割った値を比誘電率といいます。分極方向と印加電界とが同一である場合の比誘電率 $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ は次式にて求められます。

$$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = C_f \cdot t_1 / (\epsilon_0 \cdot S_r)$$

また、分極方向と印加電界とが垂直である場合、比誘電率 $\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$ は、次式にて求められます。

$$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0 = C_f \cdot t_2 / (\epsilon_0 \cdot S_r)$$

ただし、 $C_f$ ：周波数1kHzにおける試料の自由容量、 $t_1, t_2$ ：電極間の距離、 $S_r$ ：電極の面積

### (7) 誘電損失 $\tan \delta_E$ (%)

誘電体に交流電界を加えると電気エネルギーの一部が熱として失われ、その損失の尺度として $\tan \delta_E$ が用いられます。誘電体に電界を加えたとき電気的変化と電界の変化との間に位相のずれ $\delta_E$ が生じ、 $\tan \delta_E$ で表します。

(8) 弾性定数

a) コンプライアンス定数  $s$  ( $\text{m}^2/\text{N}$ )

歪 $S$ を応力 $T$ の一次関数として表すのに用いられ、コンプライアンス定数を $s$ とするとHookの法則から $S=sT$ で定義されます。コンプライアンスが高い値であるとき、やわらかい(compliant)結晶であることを意味します。

b) スティフネス定数  $c$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ )

応力テンソル $T_i$ を歪テンソル $S_j$ の一次関数として表すのに用いられ、スティフネス定数を $c_{ij}$ とするとHookの法則から $T_i=c_{ij} \cdot S_j$  ( $i=j=1\sim 6$ )で定義されます。スティフネスが高い値を示すときかたい(Stiff)結晶であることを意味します。

c) ヤング率  $Y^E$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ )

単軸引張りあるいは、単軸圧縮状態における歪の比例定数を意味し、コンプライアンス定数の逆数として表されます。 $Y^E=1/s^E$

d) ポアソン比  $\sigma^E$

分極軸方向に応力を加えた時、分極方向に生じる歪とそれと直交する方向に生じる歪の比を表します。

(9) 線膨張率  $\alpha$  ( $1/^\circ\text{C}$ )

物質は、温度の上昇に伴い、膨張もしくは収縮をおこすわけで、ある任意の方向における熱膨張による変化の割合を線膨張率といいます。線膨張率を $\alpha$ とし、 $t_1$ °Cでの固体の長さを $l_1$ 、 $t_2$ °Cでの長さを $l_2$ とすると $\alpha$ は次式で表されます。

$$\alpha = \frac{1}{l_1} \left( \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} \right)$$

(10) 温度係数 (ppm/°C)

温度変化に対する物理量の変化の割合を意味します。

(11) 経時特性 (%/年)

経時日数に対しての物理量の変化の割合を意味します。

## 4. 当社圧電セラミックス材料の紹介

圧電セラミックス材料を応用する上で、各材料のもつ特性を十分理解し、使い分けることが重要なポイントとなります。そこで、ここでは、応用目的に応じた材料を選択する上での手がかりとなる各種材料特性の紹介を行います。

### 4-1 各種圧電セラミックス材料基本特性

NJコンポーネントの標準的な各種圧電セラミックス材料特性をTable 1に示します。

Table1 各種圧電セラミックス材料基本特性

項目 (単位)	記号	P-10	P-11	P-12	P-15	P-17	P-24	P-31	P-34	P-37
周波数定数 (Hz・m)	Nr	1980	1989	2016	2009	2012	2436	2168	2407	2602
	N31	1396	1420	1443	1432	1508	1754	1614	1722	1891
	N33	1345	1399	1416	1344	1356	1701	1493	1714	1890
	Nt	2015	1984	2103	1994	2163	2152	2106	2148	2190
	N15	900	919	966	786	971	1098	965	1088	1202
電気機械結合係数 (%)	Kr	63.2	62.7	64.3	63.0	68.0	46.4	61.6	46.8	29.9
	K31	34.8	35.5	35.8	41.2	33.4	23.0	35.6	26.4	10.7
	K33	72.8	71.8	73.6	75.6	77.7	62.0	72.6	56.3	35.5
	Kt	48.1	47.4	48.6	46.6	47.9	45.8	47.8	45.3	34.8
	K15	67.7	64.5	63.3	80.6	67.3	56.2	69.1	44.3	29.8
圧電d定数 ( $\times 10^{-12}$ m/V)	d31	-197	-208	-251	-180	-262	-80.5	-150	-90.4	-24.4
	d33	454	450	556	337	718	232	350	200	81.8
	d15	595	561	611	845	849	308	522	225	103
圧電g定数 ( $\times 10^{-3}$ V・m/N)	g31	-10.5	-10.1	-8.4	-14.6	-6.6	-7.0	-10.5	-8.4	-4.2
	g33	24.1	21.8	17.1	33.4	18.0	20.0	24.6	18.6	14.2
	g15	34.6	32.1	25.8	45.0	21.1	29.6	35.0	24.8	19.5
圧電e定数 ( $\text{c}/\text{m}^2$ )	e31	-4.38	-5.67	-7.75	-10.8	2.73	2.82	-3.39	-3.39	2.61
	e33	18.6	19.2	23.1	8.7	35.6	21.3	18.7	14.4	11.0
	e15	13.3	13.2	15.5	14.4	21.5	10.7	13.6	7.9	4.6
圧電h定数 ( $\times 10^9$ V/m)	h31	-0.51	-0.59	-0.60	-1.81	0.13	0.40	-0.50	-0.47	0.50
	h33	2.69	2.38	2.34	3.81	2.16	2.56	3.23	2.27	2.10
	h15	1.43	1.29	1.10	2.19	0.97	1.51	1.76	1.08	0.94
機械的品質係数	Qm	87.1	81.2	55.2	52.0	25.3	3065	1947	3159	3897
誘電損失(%)	$\tan\delta\epsilon$	1.59	1.46	2.03	2.80	4.21	0.143	0.579	0.329	0.882
ヤング率 ( $\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	$Y^E_{33}$	4.83	5.27	5.23	5.07	4.67	8.22	6.09	8.54	10.86
	$Y^E_{11}$	5.87	6.07	6.13	6.46	6.67	9.43	8.03	9.17	11.12
	$Y^E_{44}$	2.24	2.35	2.55	1.70	2.53	3.47	2.61	3.52	4.42
比誘電率	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	2127	2334	3367	1399	4504	1290	1607	1215	651
	$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	1946	2004	2673	2149	4548	1173	1682	1025	593
キュリー点(°C)	Tc	324	297	190	351	148	270	288	310	347
共振周波数温度係数 (ppm/°C)	-20°C~20°C	75.1	122	299	-687	-939	58.3	-4.56	155	-39.5
	20°C~60°C	-227	73.3	0	-743	-442	-4.16	-68.8	62	-20.3
比誘電率温度係数 (ppm/°C)	-20°C~20°C	2625	2137	3874	4800	7415	1962	2101	1422	1432
	20°C~60°C	3232	2849	5627	5921	15660	3085	4570	2460	2358
共振周波数経時特性 (%/年)		0.558	0.517	0.340	0.431	-0.149	0.115	0.292	0.144	-0.046
比誘電率経時特性 (%/年)		-0.50	-0.896	4.10	-7.582	7.21	0.373	0.668	-1.78	0.365
ポアソン比	$\delta^E$	0.344	0.318	0.299	0.322	0.252	0.338	0.292	0.335	0.310
密度( $\times 10^3$ kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	7.529	7.534	7.362	7.893	7.337	7.662	7.701	7.722	7.784

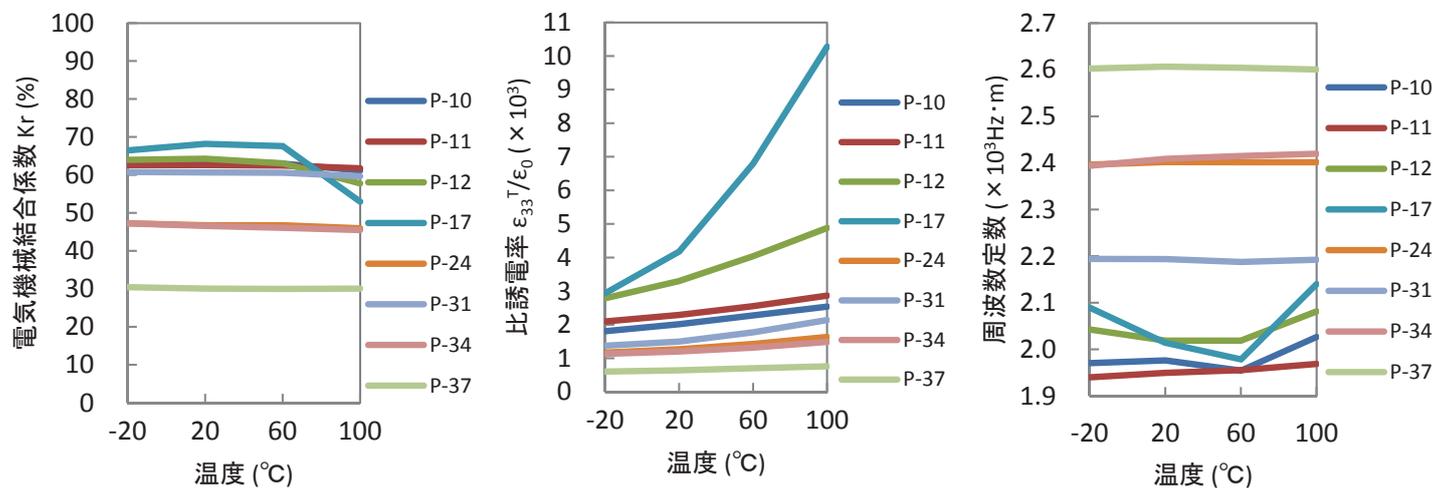
項目 (単位)	記号	P-10	P-11	P-12	P-15	P-17	P-24	P-31	P-34	P-37
コンプライアンス E=0 ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ )	S <sub>11</sub> <sup>E</sup>	17.0	16.5	16.3	15.5	15.0	10.6	12.5	10.9	9.0
	S <sub>12</sub> <sup>E</sup>	-5.86	-5.23	-5.72	-4.99	-3.78	-3.58	-3.64	-3.66	-2.79
	S <sub>13</sub> <sup>E</sup>	-7.97	-7.53	-7.31	-7.73	-8.22	-4.71	-6.42	-4.57	-3.69
	S <sub>33</sub> <sup>E</sup>	20.7	19.0	19.3	19.7	21.4	12.2	16.4	11.7	9.2
	S <sub>44</sub> <sup>E</sup>	44.8	42.6	39.4	58.8	39.5	28.8	38.3	28.4	22.6
	S <sub>66</sub> <sup>E</sup>	45.8	43.4	44.1	41.0	37.6	28.4	32.2	29.1	23.6
スティフネス E=0 ( $\times 10^{10} \text{ N/m}^2$ )	C <sub>11</sub> <sup>E</sup>	12.1	11.8	12.3	13.7	12.8	18.4	16.3	17.0	19.7
	C <sub>12</sub> <sup>E</sup>	7.75	7.19	7.73	8.81	7.51	11.31	10.01	10.11	11.18
	C <sub>13</sub> <sup>E</sup>	7.65	7.53	7.65	8.83	7.81	11.49	10.32	10.57	12.38
	C <sub>33</sub> <sup>E</sup>	10.7	11.2	11.1	12.0	10.7	17.1	14.2	16.8	20.8
	C <sub>44</sub> <sup>E</sup>	2.24	2.35	2.55	1.71	2.53	3.47	2.61	3.52	4.42
	C <sub>66</sub> <sup>E</sup>	2.19	2.30	2.27	2.44	2.66	3.53	3.11	3.43	4.24
コンプライアンス D=0 ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ )	S <sub>11</sub> <sup>D</sup>	15.0	14.4	14.2	12.9	13.3	10.0	10.9	10.2	9.0
	S <sub>12</sub> <sup>D</sup>	-7.92	-7.34	-7.84	-7.62	-5.50	-4.14	-5.22	-4.42	-2.82
	S <sub>13</sub> <sup>D</sup>	-3.21	-3.00	-2.63	-1.72	-3.50	-3.10	-2.74	-2.89	-3.35
	S <sub>33</sub> <sup>D</sup>	9.72	9.20	8.79	8.45	8.49	7.49	7.76	8.00	8.04
	S <sub>44</sub> <sup>D</sup>	24.5	24.6	23.5	20.8	21.6	19.6	20.0	22.8	20.6
	S <sub>66</sub> <sup>D</sup>	45.8	43.4	44.1	41.0	37.6	28.4	32.2	29.1	23.6
スティフネス D=0 ( $\times 10^{10} \text{ N/m}^2$ )	C <sub>11</sub> <sup>D</sup>	12.3	12.1	12.7	14.1	12.9	18.5	16.5	17.1	19.0
	C <sub>12</sub> <sup>D</sup>	7.97	7.52	8.18	8.48	7.56	11.49	10.29	10.27	10.56
	C <sub>13</sub> <sup>D</sup>	6.71	6.40	6.25	4.44	8.42	12.44	9.44	9.89	12.32
	C <sub>33</sub> <sup>D</sup>	16.9	16.9	18.1	15.3	18.1	21.5	21.2	21.2	22.2
	C <sub>44</sub> <sup>D</sup>	4.13	4.02	4.25	4.87	4.63	5.08	5.00	4.38	4.85
	C <sub>66</sub> <sup>D</sup>	2.18	2.30	2.27	2.44	2.66	3.53	3.11	3.43	4.24
逆誘電率 応力=0 ( $\times 10^8 \text{ m/F}$ )	$\beta_{11}^T$	0.581	0.564	0.423	0.526	0.248	0.963	0.672	1.102	1.890
	$\beta_{33}^T$	0.531	0.484	0.335	0.863	0.251	0.866	0.703	0.930	1.735
逆誘電率 歪=0 ( $\times 10^8 \text{ m/F}$ )	$\beta_{11}^S$	1.07	0.97	0.71	1.52	0.45	1.41	1.29	1.37	2.07
	$\beta_{33}^S$	1.16	1.03	0.77	2.09	0.64	1.42	1.50	1.56	2.00
線膨張率 $\alpha$ 分極軸方向 ( $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )	25°C~50°C	1.31	1.02	3.61	-5.80	4.44	0.60	2.64	1.20	-0.40
	50°C~100°C	-5.15	-0.81	3.00	-4.00	2.52	-3.31	-3.35	-0.90	-0.60
	100°C~150°C	-8.18	-5.08	-3.81	-9.33	-14.8	-6.22	-15.0	-4.52	-1.2

r=径方向, 31=長さ方向、33=厚み方向, t=厚み縦方向, 15=厚みすべり方向

#### 4-2 温度特性, 経時特性

Fig.12 に各材料の温度特性を示します。

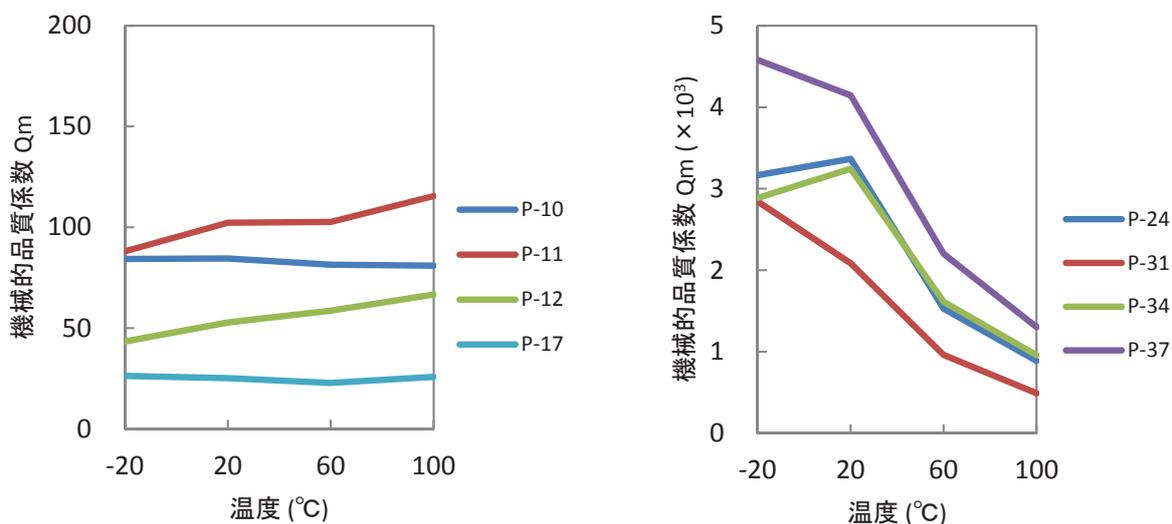
Fig.12- d , e に見られるように, 温度特性のhigh Q材とLow Q材の顕著な差は $Q_m$ にあります。



(a)電気機械結合係数 $K_r$ の温度特性

(b)比誘電率の温度特性

(c)周波数定数の温度特性

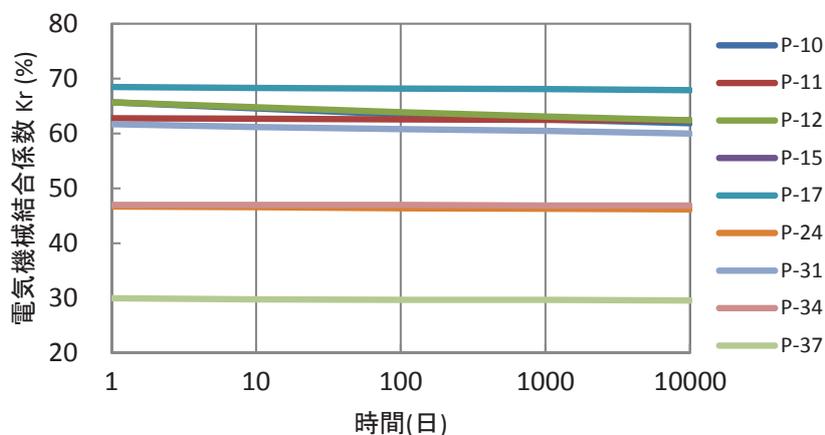


(d)機械的品質係数 $Q_m$ の温度特性

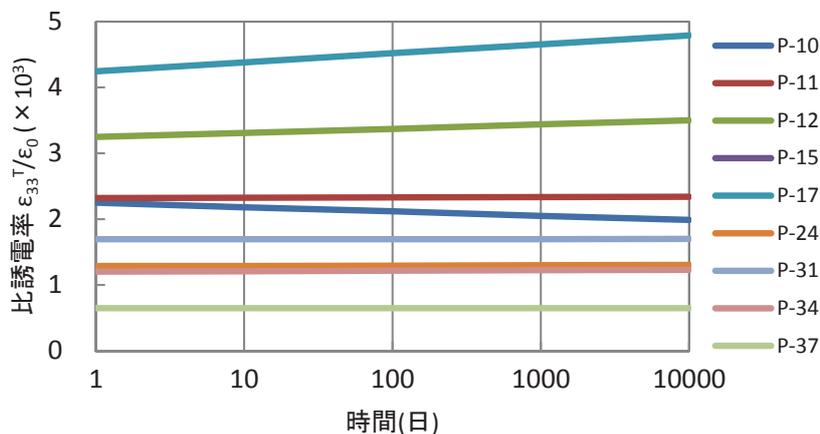
(e)機械的品質係数 $Q_m$ の温度特性

Fig.12 各種材料の温度特性

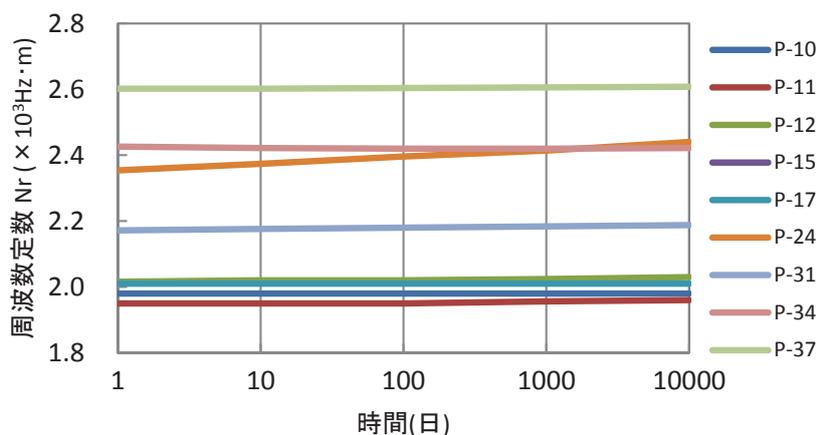
Fig.13に各材料の経時特性を示します。  
 各材料とも経時変化は少なく安定しているといえます。



(a) 電気機械結合係数 $K_r$ の経時特性



(b) 比誘電率  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$  の経時特性

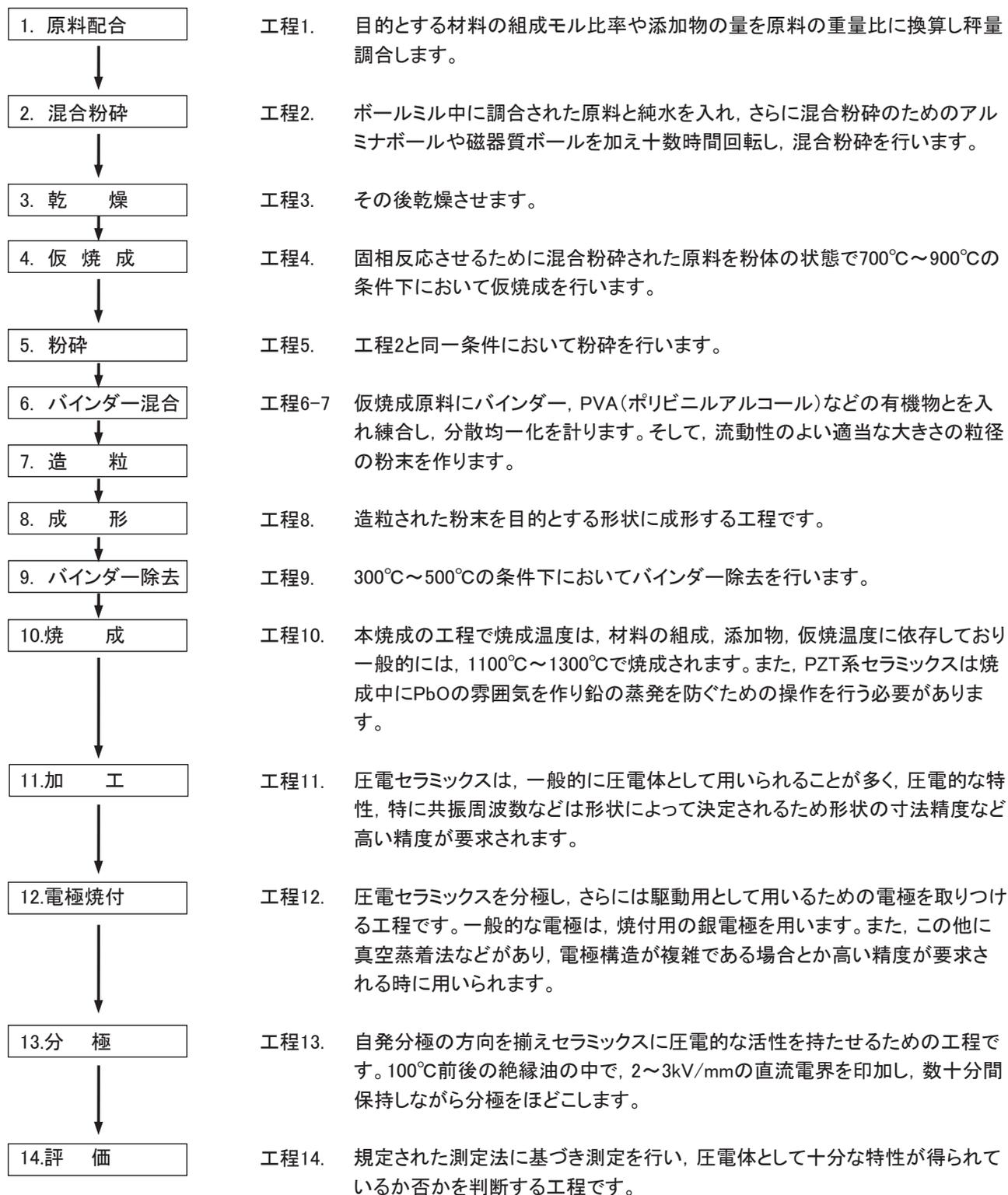


(c) 周波数定数 $N_r$ の経時特性

Fig.13 各種材料の経時特性

### 4-3 製造プロセス

圧電体として用いられるセラミックスは、 $Pb(Zr, Ti)O_3$ 、 $BaTiO_3$  などのような組成の原料粉末を押し固めて成形したものを通常 $1000^{\circ}C$ 以上の高温で焼成して得られる焼物です。ここでは、圧電セラミックスの製造工程についての説明を行います。各製造工程を一般的に解説すると以下ようになります。



#### 4-4 振動子形状と電極

NJコンポーネントの圧電セラミックスの応用製品として、代表的な圧電振動子各種形状および電極形状例をFig.14に示します。

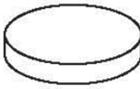
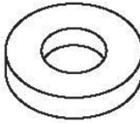
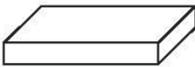
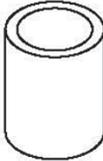
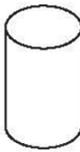
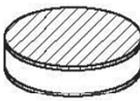
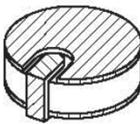
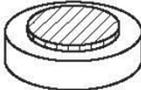
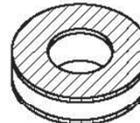
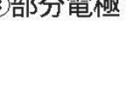
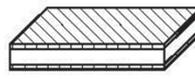
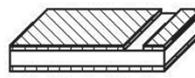
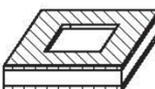
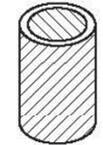
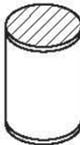
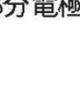
種類	円板	円環	角板	円筒	円柱
形状					
主な電極形状	①両面電極  ②折り返し電極  ③部分電極 	①両面電極  ②折り返し電極  ③部分電極 	①両面電極  ②折り返し電極  ③部分電極 	①両面電極  ②部分電極  ③折り返し電極 	①両面電極  ②折り返し電極  ③部分電極 

Fig.14 形状一覧

### 5. 圧電セラミックス材料の応用技術

#### 5-1 デバイス設計例

圧電セラミックスは、機械的エネルギーと電気的エネルギーとの間の変換素子として多種多彩な応用面を持っています。現在、圧電セラミックスは、エネルギー変換が、材料自身で行われ、直接的であることから多くのデバイスが開発されています。この場合、どのような材料を用い、どのような形状にするかが重要なポイントとなってきます。そこで、本項目においては各デバイスの動作原理を紹介すると共にデバイスから求められる材料への要求など基本的な事項についての説明を行います。

(1) 圧電アクチュエータ

圧電アクチュエータは、逆圧電効果すなわち外部から印加された電界に応じて歪を発生する現象を利用したもので、圧電体の微小変位を電氣的に制御する素子を指します。まず、圧電アクチュエータの動作原理を見てみると次の事が上げられます。分極と同一の方向に正の直流電圧を印加すると圧電セラミックスは伸び逆に負の直流電圧をかけると縮みます。また、交流の電圧をかけると周波数・電圧に応じて交流の歪が発生します。この時、交流の周波数と、その圧電セラミックスの形状によって決まる固有振動数とが一致すると共振をおこし、非常に大きな振幅が得られます。これらのことからアクチュエータの動作方法は目的に応じて使い分ける必要があるといえます。また、アクチュエータに対する要求性能は、駆動電圧、変位量、発生力などが上げられます。以下にそれぞれアクチュエータの動作原理についての説明を行います。

a) 縦効果アクチュエータ

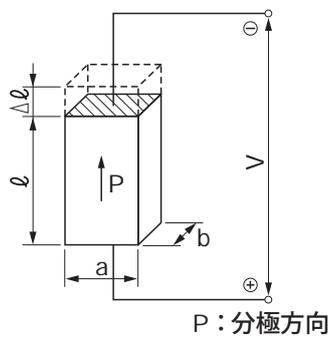


Fig.15 縦効果アクチュエータ

・ 圧電素子の縦効果を利用したアクチュエータで長さ方向に分極されており、この方向に電圧を印加すると長さ方向に伸び (Fig.15) その変位量 ( $\Delta l$ ) および、発生力 ( $F_1$ ) は次式で表されます。

$$\bullet \Delta l = d_{33} \cdot V$$

$$\bullet F_1 = \frac{a \cdot b}{l} \cdot \frac{d_{33}}{S_{33}^E} V$$

b) 横効果アクチュエータ

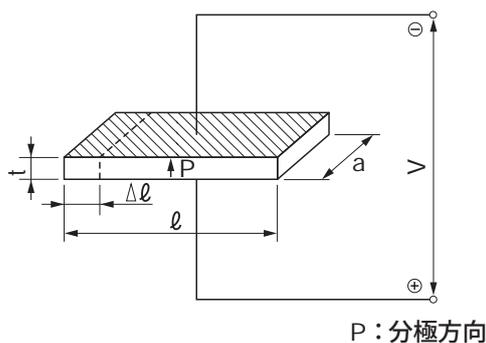


Fig.16 横効果アクチュエータ

・ 圧電素子の横効果を利用したアクチュエータで、厚さ方向に分極されており、この方向に電圧を印加すると長さ ( $l$ ) 方向に縮み (Fig.16) その変位量 ( $\Delta l$ ) および、発生力 ( $F_2$ ) は次式で表されます。

$$\bullet \Delta l = d_{31} \cdot V \cdot \frac{l}{t}$$

$$\bullet F_2 = a \cdot \frac{d_{31}}{S_{11}^E} \cdot V$$

この横効果を利用したアクチュエータの応用例として円筒形アクチュエータ (Fig.17) などがあります。Fig.17に示される円筒型アクチュエータは、外向きに分極されており、分極方向に電圧を印加すると長さ方向 ( $l$ ) に縮み、その変位量 ( $\Delta l$ ) は次式で表されます。

$$\Delta l = d_{31} \cdot V \cdot \frac{l}{t}$$

また、円筒形アクチュエータの電極の付け方により、X, Y, Z方向へ単一素子で動作することも可能となります。その例をFig.18に示します。

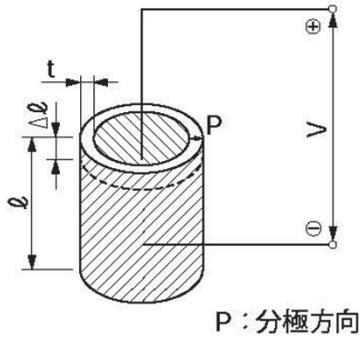


Fig.17 円筒型形アクチュエータ

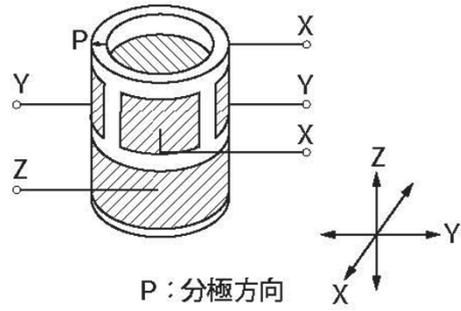


Fig.18 3軸動作作用アクチュエータ

c) 積層アクチュエータ

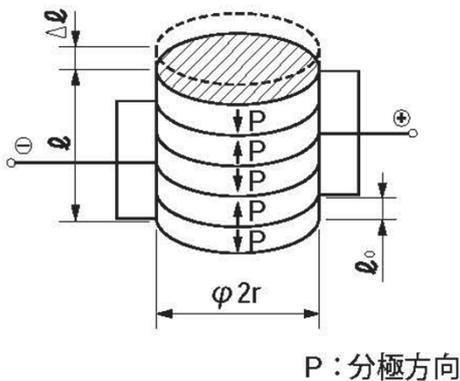


Fig.19 積層アクチュエータ

- ・ 厚さ方向に分極された圧電セラミックスの薄板をn枚積層とし、内部には電極が埋め込まれ、これが一層おきに外部で電氣的に並列に接続された構造をしています。(Fig.19)積層アクチュエータの一枚当たりの厚さを $l_0$ とすると分極方向に電圧(V)を印加した場合の変位量( $\Delta l_0$ )は $\Delta l = d_{33} \cdot V$ となります。従って、n枚積層した場合の変位量( $\Delta l$ )は次式で書き表されます。

$$\Delta l = n \cdot d_{33} \cdot V = \frac{l}{l_0} \cdot d_{33} \cdot V$$

また、この時の発生力(F3)は次式で求められます。

$$F_3 = n \cdot \frac{\pi r^2}{l_0} \frac{d_{33}}{s_{33}^E} \cdot V = \frac{l}{l_0^2} \pi r^2 \frac{d_{33}}{s_{33}^E} \cdot V$$

ただし、 $d_{33}$ :圧電d定数,  $s_{33}^E$ :コンプライアンス

上式の関係から最高駆動電圧が決まると圧電素子1個の厚みと積層枚数が決まり、それにより変位量が決まります。さらに、変位量と発生力から断面積が決定されることとなります。このような圧電セラミックス薄板を単に積層したもの以外にボルトで締めつけるボルト締め積層アクチュエータがあります(Fig.20)。ボルト締めタイプは、積層された圧電薄板の両端に2個の金属ブロックを取りつけ、1本の金属ボルトで締めつける構造となっています。締めつけは素子の伸びが十分得られる範囲のバネ力で予備加圧されています。このような構造は単に接着剤にて積層した構造とは異なり、横からの応力に対し非常に強く若干の引っ張り応力にも耐え、さらに発生力が大きいという特長を持ちます。

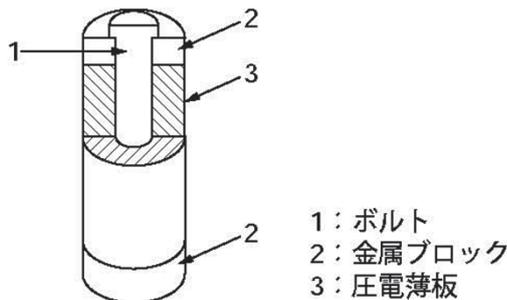
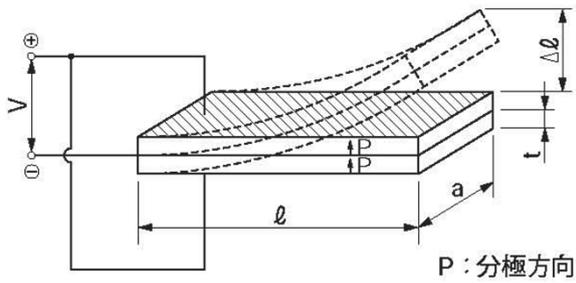


Fig.20 ボルト締め積層アクチュエータ

d) バイモルフ・アクチュエータ



・厚み方向に分極された2板の薄い圧電板から構成されており、内部に電極が埋め込まれ貼り合わされています (Fig.21)。このような構造を持つバイモルフに図のような電圧を印加すると上部の素子は、圧電横効果によって縮み、下部の素子は伸びます。その結果、全体としては上部に曲がる事になります。この先端の変位 ( $\Delta l$ ) および、発生力 ( $F_4$ ) は次式で表されます。

Fig.21 バイモルフ・アクチュエータ

$$\cdot \Delta l = \frac{3}{4} \left( \frac{l}{t} \right)^2 \cdot d_{31} \cdot V$$

$$\cdot F_4 = \frac{2t \cdot a}{l} \cdot \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \cdot V$$

ただし、 $d_{31}$ : 圧電定数、 $s_{11}^E$ : コンプライアンス

実用的には、2枚の圧電体の間に機械的強度を確保するための薄い金属板をはさんだ構造をしています。なお、バイモルフ・アクチュエータの場合、発生力が小さいという反面大きな変位がとれ電磁ノイズがなく低騒音であるという特長をもつことから電気機器の局所冷却用バイモルフ・ファンやマイクロポンプ、さらに磁気ヘッドのオートトラッキング構造などに用いられています。

Fig.22にアクチュエータの特性を示します。Fig.22-aにみられるように変位は若干のヒステリシスを伴い発生力については両者に大きな差が認められます。(Fig.22-b)

また、材料特性の違いによるアクチュエータの電圧-変位特性(ヒステリシス曲線)をFig.22-cに示します。このようにsoft材(キュリー点が200°C未満の材料)の場合は大きな変化をもたらすもののヒステリシスが大きく、これに対し、hard材(キュリー点が300°C以上の材料)の場合は変位量は少ないがヒステリシスもはるかに小さいという特長を持っています。

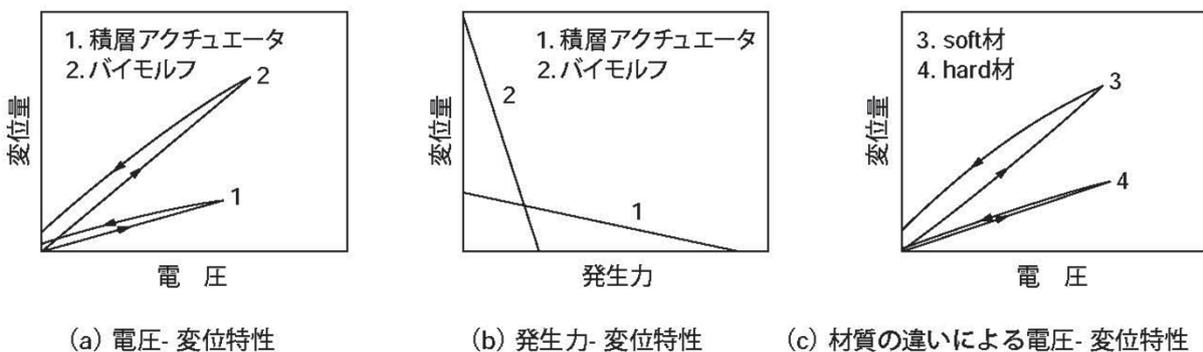


Fig.22 アクチュエータの特性

圧電アクチュエータに要求される材料特性を列挙すると次のようになります。

- ① 圧電d定数が高い(縦効果の場合 $d_{33}$ , 横効果の場合 $d_{31}$ )
- ② 誘電率が高い
- ③ 内部損失が大きい(注5)
- ④ キュリー点が高い

(2) 圧電ブザー, 圧電サウンダ

圧電ブザーおよび圧電サウンダは圧電セラミックスと金属板を貼り合わせ、振動板のたわみ振動を発音源としたもので、消費電力が非常に少ない事と無接点構造のため、ノイズが発生しないという特長を持っています。以下にその原理を説明します。

圧電発音体は厚み方向に分極された円板状の圧電セラミックスと弾性薄板とを貼り合わせた構造をしています。(Fig.23-a)

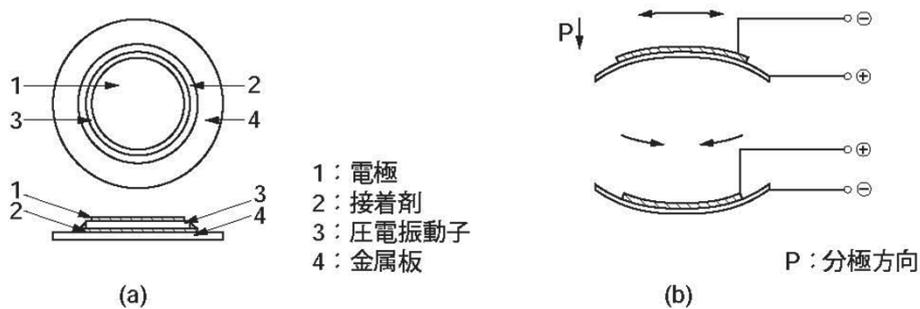


Fig.23 圧電発音体とたわみ運動

円板状圧電セラミックスに分極と同一方向の電圧を印加するとセラミックス円板は径方向に収縮し逆方向に電圧を印加すると径方向に伸長しようとする性質を持っています。この性質を利用し弾性薄板を貼り合わせると、全体としてたわみが生じます。(Fig.23-b) この場合、交流電圧を印加すると、たわみ運動は連続となり、その周波数・電圧に応じた音波を発生するようになります。圧電ブザーおよび圧電サウンダの構造図をFig.24に示します。

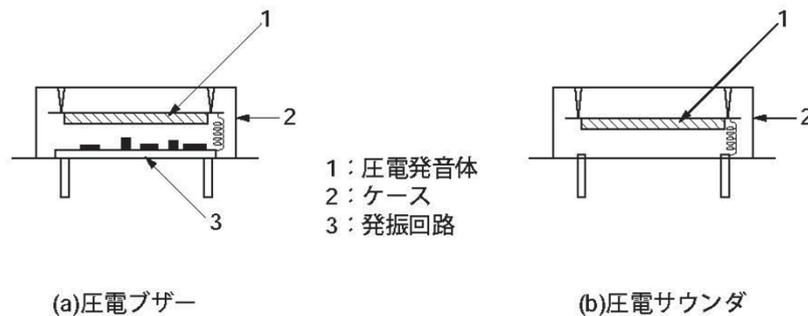


Fig.24 圧電ブザー, 圧電サウンダ構造図

圧電ブザーは、円筒ケースと裏ぶたの間に圧電振動板とトランジスタや抵抗などの電子部品からなる発振回路から構成されています。また、圧電サウンダは円筒ケースと圧電振動板から構成されており基本的には圧電ブザーから発振回路を取り除いたものに等しく非常に簡単な構造をしています。従って、圧電ブザーおよび圧電サウンダを設計する上で重要な要素となるのは、音響特性向上の為のケースの共鳴器設計と圧電振動板の設計であるといえます。そこで、次にその設計方法についての説明を行います。圧電振動板の支持方法には大別すると節部支持 (Fig.25-a)と周辺支持 (Fig.25-b)があります。Fig.25にその支持方法と特性を示します。

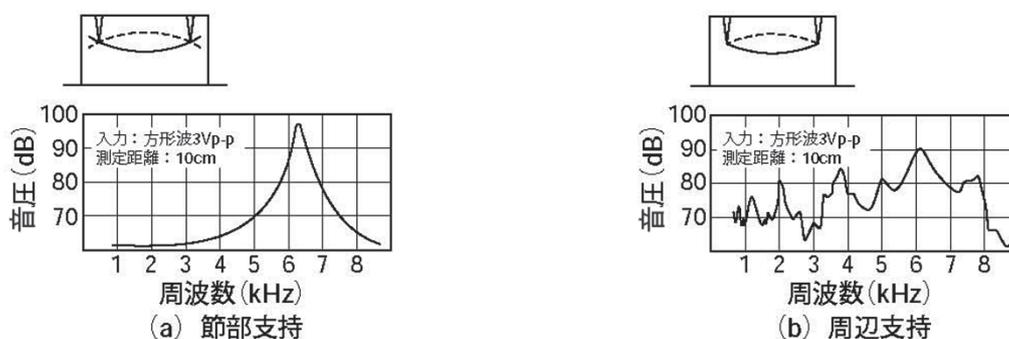


Fig.25 圧電振動板の支持方法

節部支持は、振動を制御しない自由振動に近い状態にあるため圧電振動板のインピーダンス特性を忠実に再現することができ、支持への機械的応力に対して強く安定した特性が得られるという特長を持ちます。従って、自励発振で用いる時はほとんどの場合節部(円)支持にして効率を上げ、大きな音圧が得られるように設計します。周辺支持は、圧電振動板周辺の振動を制御して、圧電振動板のもつ共振周波数を下げ広帯域化及び周波数特性の平坦化する時に用います。しかし、支持部への機械的応力に対して弱く、安定性が低くなるという欠点を持ちます。また、圧電振動板をこのような節部(円)支持あるいは周辺支持しただけでは、あまり大きな音圧を得る事ができません。そこで、大きな音圧を得るために、圧電振動板と空気中のインピーダンスを整合させる必要があり、その役割は共鳴器V (Fig.26)が行います。共鳴器の構造は次式により設計されます。

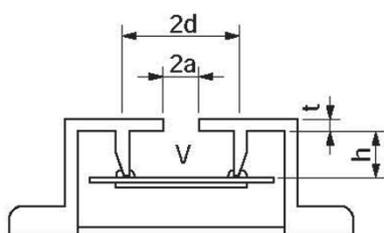


Fig.26 共鳴器構造

$$f_{cav} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi a^2}{(16a/3\pi + t)d^2 \pi h}} \text{ (Hz)}$$

ただし、 $f_{cav}$ : 共鳴器Vの共鳴周波数 (Hz)

$c$ : 音速  $(331 + 0.6T) \times 10^3$  (mm/sec)

$d$ : 支持円環の半径 (mm)

$a$ : 放音孔の半径 (mm)  $h$ : 共鳴器の高さ (mm)

$t$ : 放音孔の肉厚 (mm)

圧電振動板に要求される圧電セラミックス材料特性を列挙すると次のようになります。

- ① 電気機械結合 ( $K_{31}$ ) が高い
- ② 誘電率が高い
- ③ 内部損失が大きい

### (3) 超音波モータ

超音波モータの動作原理は、Fig.27に示すように圧電体を励振させることにより弾性振動体(ステータ)表面に高次の曲げ振動を発生させ進行波を作ります。そして、その上のスライダをステータに一定の圧力で圧着することにより、両者間に発生する摩擦力によってスライダを駆動させるというものです。このように超音波モータの駆動力は、進行波型弾性屈曲波によって得られています。この方式のモータを進行波型超音波モータと呼びます。Fig.28に超音波モータの概略図および圧電振動子の電極パターンを示します。弾性体円環板上に弾性屈曲波を発生させるには、圧電振動子を弾性円環板の下に張りつけ、その振動子の伸縮運動を利用して弾性屈曲波を発生させます。すなわち、弾性円環板下面の圧電素子はFig.28-clに示されるような分極が施されており、この素子に交流電圧を加えるとそれぞれの区域ごとに伸縮運動をし、弾性円環板上に弾性屈曲波が発生するというわけです。

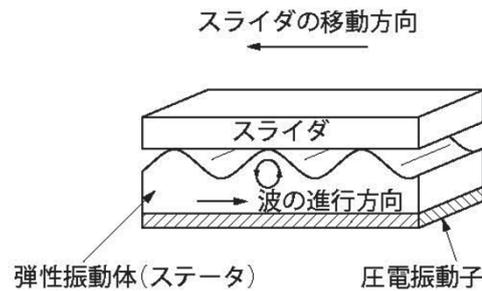
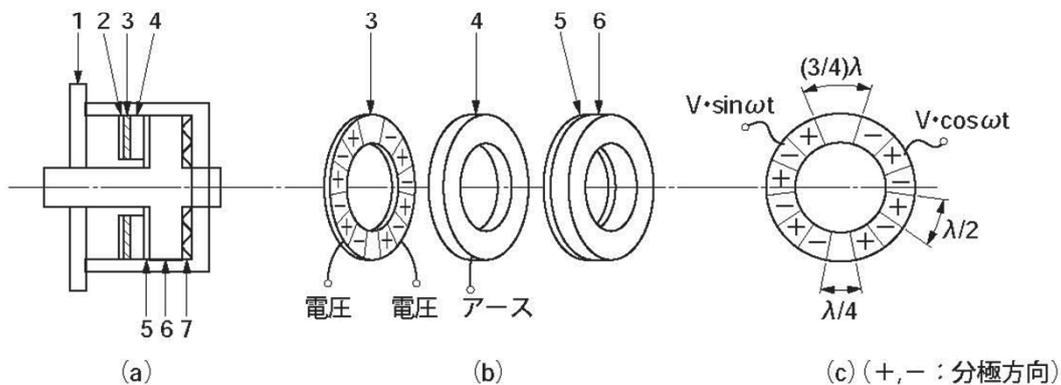


Fig.27 進行波超音波モータ原理図



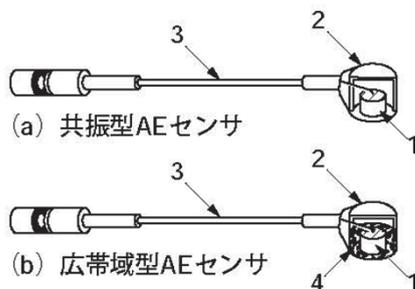
1: 台, 2: 硬質ゴム, 3: 圧電振動子, 4: 弾性振動体(ステータ), 5: ランニング用ゴム, 6: ロータ(スライダ), 7: ロータ押さえ

Fig.28 超音波モータ概略図

この時、周波数を弾性円環板の固有振動数に設定し、左右の加振周期の位相を90°すなわち、1/4波長ずらすと左右それぞれの定常波を発生するようになり、両方の波が合成されると位相のずれにより進行波になります。このようにして、弾性円環板上に進行波の弾性屈曲波を発生させることが可能となるわけです。また、周波数の相違によりロータは正転・逆転となります。このモータの特長を列挙すると次の事が考えられます。①小形・軽量化が可能となる。②低速・高トルク領域での特性が優れており振動振幅は数μmオーダーであるためμm単位の位置決めが容易である。③駆動源である圧電素子は電気・機械エネルギー変換率が高いため、高効率なモータとなる。④このモータは、超音波領域で使用するため高周波電源を必要とする。などです。このように、圧電振動子から出る小さな変化を大きな変化として効率よく変換するのがこのモータの基本的原理であり特長であるといえます。

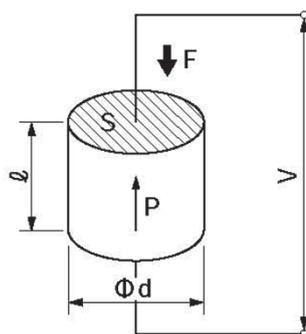
[機械的エネルギー → 電気的エネルギー]

(4) AEセンサ



1.圧電振動子 2.ケース 3.ケーブル 4.パッキング材

Fig.29 AEセンサの構造図



P：分極方向  
S：電極面積

Fig.30 正圧電効果

$$V = g_{33} \cdot l \left( \frac{F}{S} \right)$$

ただし、 $g_{33}$ ：圧電定数 S：電極の面積

AE (Acoustic Emission) は、固体が塑性変形あるいは破壊に至る割れの進行に伴って、歪エネルギーが解放されるときに発生する弾性波（超音波領域）を意味しAEセンサとは、この弾性波を被測定物に接着固定された状態で検出するセンサを指します。AEセンサの構造図を Fig.29に示します。Fig.29-aは、共振型と呼ばれる構造をしており圧電セラミックスの共振現象を利用したもので微弱なAE波を少しでも高感度でとらえようとする目的で設計されたものです。しかし、この場合周波数感度帯域が狭くなるという性質を持っており検出AE波の特性に合った設計が必要となります。一方、Fig.29-bに示す広帯域型AEセンサの場合、周波数感度特性が広くとれるという特長をもっています。しかしその特長を出すために共振を押さえ込む構造をとり、その結果検出感度の低下につながる要因を持つこととなります。以下に共振型AEセンサの原理および設計例について説明を行います。

AEの検出は、圧電体がAE波の機械的振動エネルギーを電気的エネルギーに変換させることで行われます。Fig.30に示すように、圧電体の分極方向Pと平行に力F（この場合弾性波振動による力）が加わったとすると開放出力電圧Vが生じ次式の関係が成立することになります。

また、圧電セラミックスはコンデンサと見なせるので容量をCとすると $Q=CV=C \cdot g_{33} \cdot \ell \cdot (F/S)$ の電荷が電極面に発生することになります。AEセンサは、この正圧電効果を利用しています。次に、設計方法は以下ようになります。AE波の場合縦波が最も強く放出されるということからセンサ素子は縦波が最も強制的に励振する形状にすればよいことになります。また、AE波の検出周波数が既知である場合には、その周波数で最大感度が得られる共振形状を採用することになります。感度自体は圧電素子の体積が大きい程良いという傾向があり、また、小形で高感度な寸法形状にするには径( $\phi d$ )/高さ( $\ell$ )の比が1に近い場合となります。しかし、この場合縦方向振動と径方向振動モードが結合したモードとなり、純粋な振動モードではなくなってしまうわけで、それ故に単に周波数定数 $N_{33}$ を適用して寸法を決定することはできなくなるわけです。すなわち、検出周波数を $f_r$ とすると圧電振動子の縦効果から $f_r=N_{33}/\ell$ の関係が導き出せ形状が決定されるわけですが、正確な寸法は試行により求めることが必要となります。ここで、検出周波数を400kHz近傍に設定し、設計された共振型AEセンサの特性をFig.31に示します。

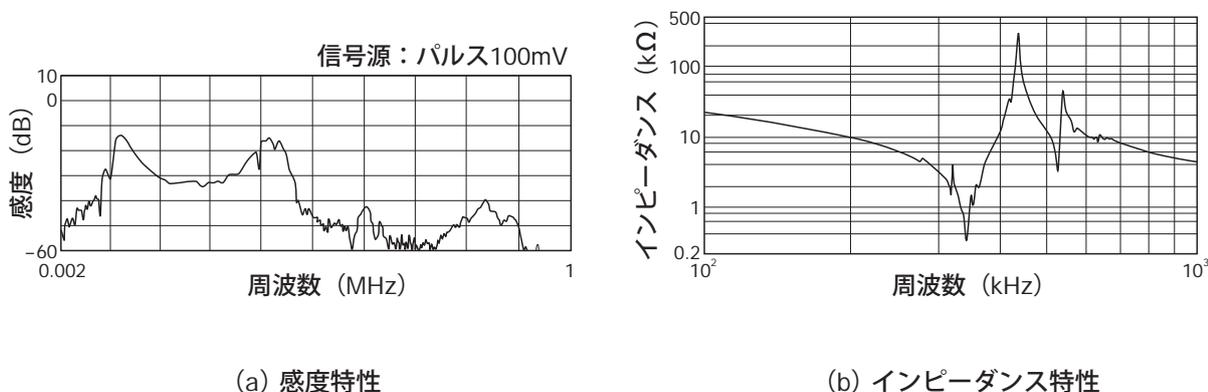


Fig.31 AEセンサの特性

#### (5) 加速度センサ

加速度センサとは、機械的なショックや振動を受けると電気出力を発生する電気変換器を指し、原理的にはAEセンサと同じといえます。AEセンサと異なる点はAEセンサの場合、微弱な信号を検出する為、主に共振を利用しているのに対し、加速度センサは比較的大きな信号を検出対象とし、共振周波数より非常に低い周波数においての力の変化すなわち、加速度に比例した電荷の変化をひき起こす効果を利用している点にあります。

加速度センサの基本的構造をFig.32に示します。このような構造を持つセンサを、圧縮型加速度センサと呼びます。Fig.32に見られるように2板の円板状圧電素子の上に比較的重い金属円板をのせ、さらに、圧力バネにより加圧された構造をしています。センサが振動を受けると圧電体上の金属円板が力の変化を発生し、これが素子に影響して、正圧電効果により力の変化(加速度)に一次的に比例した電荷を引き起こすこととなります。このタイプの加速度センサは、圧電素子の縦効果を利用しています。Fig.33に加速度センサの特性を示します。AEセンサおよび加速度センサに要求される材料特性を列挙すると次のようになります。

- ① 圧電g定数が高い。
- ② 誘電率が大きい。

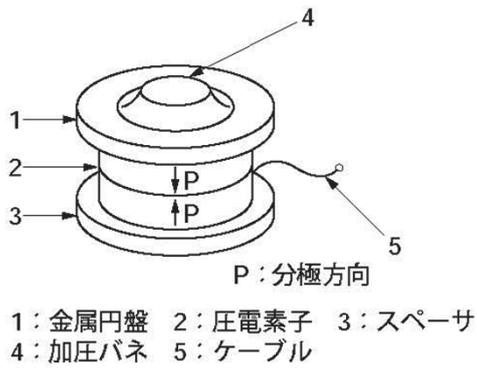


Fig.32 圧縮型加速度センサ

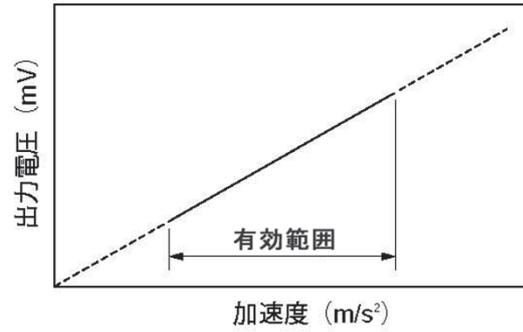
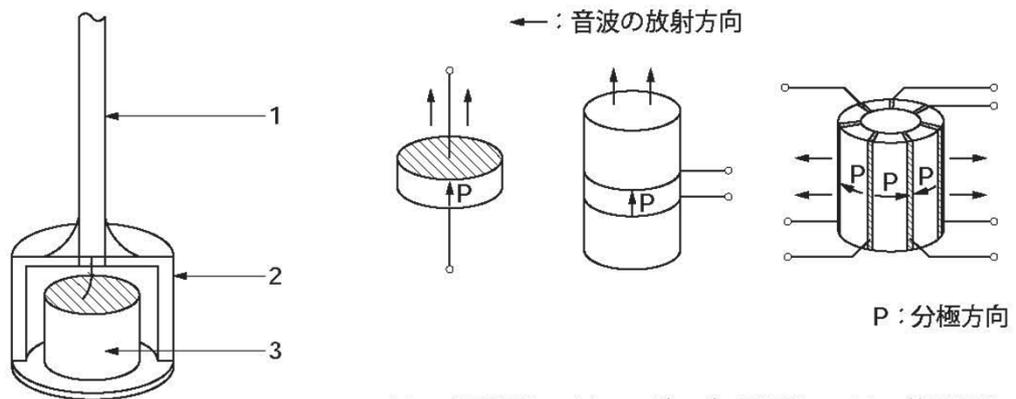


Fig.33 加速度センサの特性

[電気的エネルギー ↔ 機械的エネルギー]

(6)ソナー

ソナー(SONAR)とは、Sound Navigation and Rangingの略で、一般にパルスの音波を水中に発射して目標の反響を受信し、目標までの距離、方向などを知るための船舶用計測器の総称で主なものに測探機、魚群探知機、深信儀などがあります。多くのソナーは、単体で送受波両機能をもっておりその構造は送受波振動子に送電用ケーブルを付け、樹脂などで密閉した完全な防水構造をしています(Fig.34)。



1:ケーブル,2:樹脂,3:送受波用圧電振動子

Fig.34 ソナーの概略図

Fig.35 送受波用圧電振動子の主な形状

ソナーを構成している送受波器用圧電振動子は目的に応じてそれぞれ周波数を選定する必要があります。一般的に近距離用では、200kHz、500m以上の遠距離用には、24～75kHzの超音波が用いられ、振動子の共振点で使用されています。Fig.35にソナーに使用される代表的な圧電振動子の形状を示し、以下にその特長を列挙します。

- Fig.35-a
- ① 厚み寸法を変える事により共振周波数の調整が容易である。
  - ② 構造的に機械的強度が大きい。
  - ③ 指向性がある。

- Fig.35-b
- ① 低インピーダンスで低い周波数が得られる。
  - ② 指向性がある。

- Fig.35-c
- ① 電気機械結合係数が大きい。
  - ② 共振周波数の調整が容易である。

Fig.35-aおよびbの振動子を持つソナーは、指向性の鋭い超音波送受波器でサーチライトソナーと呼ばれます。これは、サーチライトのように魚群などに向け超音波パルスを照射し、反射波の到達時間から距離を、また、受波感度が最大になるソナーの向きから方向を知るものです。これに対しFig.35-cの振動子を持つソナーは、スキャンングソナーと呼ばれ、送波時には円筒配置された全素子を駆動して全周方向に超音波を出し受波時には円筒上の各素子の出力をディスプレイ上に写し出し反射物の距離と方向を二次的に表示させるのに用います。

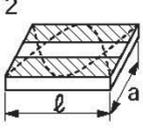
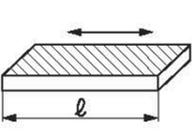
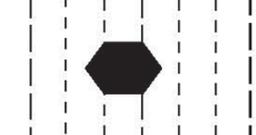
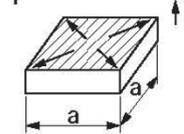
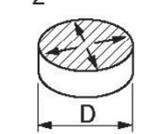
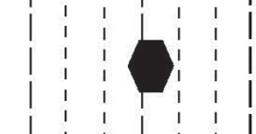
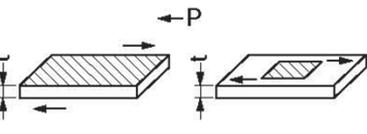
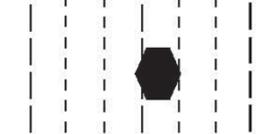
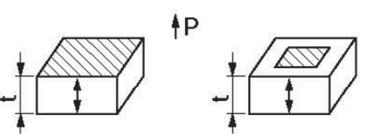
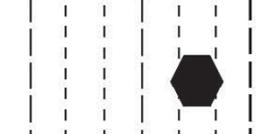
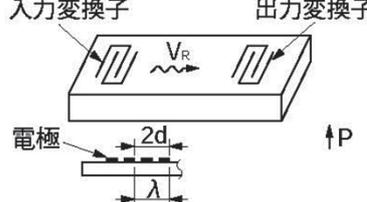
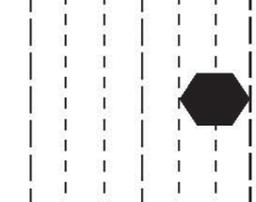
ソナー用圧電振動子に要求される材料特性を列挙すると次のようになります。

- ① 電気機械結合係数が大きい。
- ② 誘電損失が小さい。
- ③ 機械的品質係数が大きい。
- ④ 温度係数が小さい。

[電氣的エネルギー → 機械的エネルギー → 電氣的エネルギー]

#### (7) セラミック・フィルタ

圧電セラミックスに交流電流をくわえると、その信号に応じた振動が発生します。この時、セラミックスの物理的共振周波数に一致すると、共振より大きな変動が得られるわけでセラミックフィルタはこの共振現象を利用したものです。すなわち、圧電セラミックスに入力される電気信号を機械的信号に変換し、さらに電気信号として出力し、電気機械変換の両方の役割を果たすことによりフィルタとしての所定の特性を出すというものです。Fig.36に各種振動モードとフィルタとして利用可能な周波数帯域を示します。

周波数帯	振動モード	周波数帯 (Hz)	周波数帯 (Hz)				共振周波数
			1K	10K	100K	1M	
LF	1  2  (バイモル形状)		$1. \frac{b}{2} \cdot \frac{t}{\ell^2} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{12}}$ $2. \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \cdot \frac{a}{\ell^2} \sqrt{\frac{2}{1+\sigma}} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho}}$				
	長さ方向振動 		$\frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho}}$				
MF	1  2 		$1. \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho(1-\sigma)}}$ $2. \frac{\alpha_0}{\pi D} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho(1-\sigma^2)}}$				
HF	厚みすべり振動 		$\frac{1}{2t} \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$				
	厚み縦振動 		$\frac{1}{2t} \sqrt{\frac{Y_{33}^E(1-\sigma)}{\rho \cdot (1+\sigma) \cdot (1-2\sigma)}}$				
VHF	入力変換子 出力変換子 電極 		$V_R / \lambda = V_R / 2 \cdot d$				

P: 分極方向 ↑: 振動モード

Fig.36 各種振動モードと利用可能な周波数帯域

ただし、 $\cdot Y^E$ : ヤング率  $\cdot \sigma$ : ポアソン比  $\cdot \rho$ : 密度  $\cdot \lambda$ : 波長  $\cdot \sigma=0.3$ の時、 $\alpha_0=2.05$ とする

Fig.36のHF～VHF周波数帯に用いられる厚み縦振動子および、厚み振動子において部分的な電極を設ける場合があります。これは、電極の質量負荷効果および、圧電反作用によって振動エネルギーが電極近傍に閉じ込められることから共振割れのない単一共振が得られるためです。さらに、1枚のセラミックス基板上に小さな電極を複数設けると、それが独立した共振子として使用できるようになります。その例をFig.37に示します。他の振動モードの場合、部分的な電極を設けても共振子全体が振動するため、その効果を得ることはできません。このようなセラミックフィルタは、主に民生用通信機器に利用され、AMラジオの455kHz中間フィルタ等に使用されています。また、表面波振動を利用した表面弾性波フィルタは、数十MHz～数GHzの周波数帯における帯域通過フィルタとして使用され、TV・VTR用中間フィルタ、キーレスエントリー用共振子、GPS用フィルタ、携帯電話や通信モジュールと様々に用途を変えながら用いられてきました。今後も、移動体通信機器等の多機能化、高周波化、軽薄短小化に適応可能なデバイスとして、期待されています。なお、表面弾性波フィルタでは、電極間隔を可変させることにより周波数を調整することが可能となります。

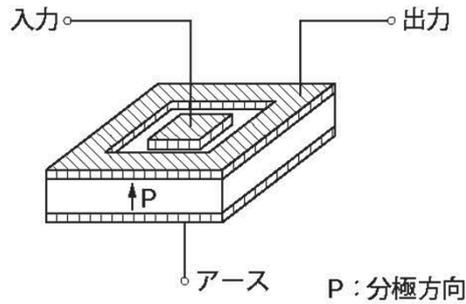


Fig.37 AMラジオ用中間フィルタ

セラミックフィルタ用圧電振動子に要求される材料特性を列挙すると次のようになります。

- ①共振・反共振周波数の温度変化ならびに経時変化がきわめて小さい。
- ②電気機械結合係数が大きい。

#### 5-2 素材選定のポイント

Table2にエネルギー変換形式とそれに対応する応用デバイスおよび、デバイスから求められる圧電材料への要求事項を示します。

Table2

エネルギー変換	主な用途	材料への要求	対応材料
電気→機械	・圧電アクチュエータ・圧電ブザー ・圧電サウンダ・超音波用洗浄器 ・超音波モータ・スピーカ・他	圧電d定数→大 誘電率→高 機械的品質係数→小	P-10 P-11 P-12 P-31
機械→電気	・AEセンサ・加速度センサ・マイクロホン ・圧電着火子・他	圧電g定数→大 誘電率→高	P-10 P-11 P-12 P-17
電気↔機械	・ソナー・超音波探知機 ・超音波探傷機・他	電気機械結合係数→大 機械的品質係数→大	P-24 P-31
電気→機械→電気	・セラミックフィルタ ・圧電昇圧トランス ・圧電音叉・他	共振・反共振周波数・温度係数→小 共振経時変化→小 電気機械結合係数→大	P-24 P-31

## 6. 用語の説明

### ・自発分極

電界も応力も加わらない状態において初めから分極している、すなわち、電気双極子が生じている、その状態量を示します。

### ・単位胞

結晶は、ある構造単位を基本に、三次元的に繰り返した構造をしています。この構造単位を単位胞といいます。

### ・分極軸(方向)

圧電セラミックスに圧電性を持たせるために、直流の高電界(数kV/mm)を印加し、自発分極の向きを揃えることを分極(poling)と呼び、その方向を分極軸といいます。

### ・hard材

キュリー一点が300°C以上の圧電材料を指します。この材質の分極は100°C前後の温度で行われ、簡単に分極および、脱分極は行えません。また、圧電d定数が小さくヒステリシスが小さいという特長を持ちます。

### ・soft材

キュリー一点が200°C未満の圧電材料を指します。この材質の分極および脱分極は、常温で簡単に行えます。また、圧電d定数は大きいヒステリシスも大きいという特長を持ちます。

### ・正圧電効果・逆圧電効果

圧電素子に力を加えると応力に比例した電気分極が発生し、対の結晶表面に正負の電荷が生じます。この現象を正圧電効果といいます。また、このような結晶に電界をかけると電界に比例した歪が生じます。これを、逆圧電効果と呼びます。

### ・横効果・縦効果振動

横効果とは、電界の方向と弾性波の伝播方向(あるいは変位方向)とが直交している場合をいい縦効果とは、それらが平行の場合を指します。

### ・ヒステリシス

物質の性質が、それ以前の履歴に依存する場合に見られる現象で履歴現象ともいわれます。すなわち物質の性質を表す物理量 $y$ (polarization, strainなど)が他の量 $x$ (電界など)の変化に伴って変化する時、 $x$ の変化過程による同一の $x$ に対する $y$ の値が異なる現象を意味します。

注1)  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ は、強誘電体 $\text{PbTiO}_3$ と反強誘電体 $\text{PbZrO}_3$ の固溶体です。反強誘電体は自発分極をもたないため圧電性は存在しません。しかし、外部電界がある特定の値を超えると自発分極が誘起されるという性質を持ちます。

注2) 圧電体において、分極という言葉はpolingという意味と、polarizationすなわち、電荷の分布が変化し、双極子モーメントを生じている現象の2通りの意味を持っています。よって、この言葉を用いる時は区別する必要があります。

注3) 結晶の物理的性質の対称性は、32の点群によって分類されます。

注4) 定電流測定回路および、定電圧測定回路については電子情報技術産業協会規格JEITA EM-4501に記載されております。

注5) 内部損失の大きい材料は、大きな変位量が得られるという特長を持ちますがヒステリシスが大きく温度特性が悪いという欠点を持ちます。

## 7. 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試験方法」 JEITA EM-4501  
電子情報技術産業協会
- (2) 電子材料工業会「圧電セラミックスとその応用」電波新聞社(1974)
- (3) 内野研二「圧電/電歪アクチュエータ」森北出版(株)(1986)
- (4) 十文字弘道・他「固体振動論の基礎」オーム社(1982)
- (5) 尾上守夫・他「アコースティック・エミッションの基礎と応用」コロナ社(1976)
- (6) 坂野久夫・他「自動車用セラミックス」(株)山海堂(1987)
- (7) BERNARD JAFFE他 「PIEZOELECTRIC CERAMICS」 ACADEMIC PRESS (1971)
- (8) 大矢寛二・他「新方式アクチュエータとその応用技術」(株)トリケップス(1985)
- (9) 「アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集」(社)日本非破壊検査協会(1983)
- (10) 一ノ瀬昇・他「圧電ブザー・発音体最新技術」総合技術出版(1985)
- (11) Charles Kittel「固体物理学入門(上)(下)」丸善株式会社

以 上