

■9群 (電子材料・デバイス) - 8編 (センサ・弾性波・機構デバイス)

---

## 3章 弾性波デバイス

### 【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 3-1 SAW フィルタ
- 3-2 BAR フィルタ
- 3-3 圧電トランス
- 3-4 圧電ジャイロ
- 3-5 圧電アクチュエータ
- 3-6 超音波モータ

## ■9 群-8 編-3 章

### 3-1 SAW フィルタ

(執筆者：垣尾省司) [2015年7月 受領]

弾性表面波 (Surface Acoustic Wave : SAW) は、波動のエネルギーが伝搬媒質の表面付近に集中して伝搬する弾性的波動である。SAW を利用した周波数フィルタが SAW フィルタである。SAW フィルタの基本要素は、圧電性基板表面に金属薄膜で形成されるすだれ状電極 (Interdigital Transducer : IDT) である。IDT による SAW の励振・受信の概略を図 1・1 に示す。IDT は平行平板状の電極指より成る正負の電極対を周期的に配置した構造であり、交差指状電極とも呼ばれる。IDT に電気信号が入力されると、圧電性基板中に電極周期を持つ電界が印加され、圧電逆効果によって周期的な歪みを持つ SAW が電極指の垂直方向に励振される。SAW は、基板の種類、方位 (カット角と伝搬方向)、及び伝搬モードによって決まる固有の位相速度で伝搬するため、様々な周波数の電気信号を入力したとしても、位相速度/電極周期により決定される周波数近傍の SAW のみが励振される。逆に、IDT に様々な波長の SAW が到達したとしても、IDT の周期と一致した波長近傍の SAW のみが圧電効果によって電気信号として受信される。したがって、図 1・1 に示すような、同じ周期を持つ 2 つの IDT を送受信電極とする構造では、上述の 2 回のフィルタリング作用により、位相速度/電極周期により決定される周波数を中心とするバンドパスフィルタが形成される。これが SAW フィルタの基本的な原理である。

SAW の位相速度は数千 m/s であり、その波長は同じ周波数を持つ電磁波の波長と比べると約 10 万分の 1 であるため、素子の小型化に有利であるという特徴を持っている。更に、固定化デバイスであるため、製造後に再調整の必要がなく、信頼性・安定性に優れていること、製造に半導体集積回路と同様のフォトリソグラフィ技術を適用でき、量産化が容易であることなどの特徴を有している。

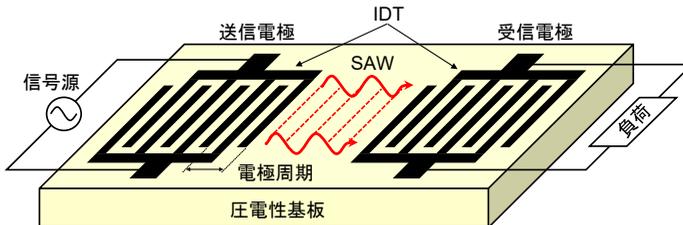


図 1・1 IDT による SAW の励振・受信 (トランスパースアル型フィルタの構造)

#### 3-1-1 圧電性基板と SAW 伝搬モード

SAW の主な特性は、位相速度、電気機械結合係数、周波数温度係数 (遅延時間温度係数)、伝搬減衰、パワーフロー角などである。電気機械結合係数は、電気的エネルギーと機械的エネルギーの間の変換効率に相当し、電気機械結合係数が大きいほど通過帯域の広いフィルタを構築できる。また、周波数温度係数が小さいほどデバイスの周囲温度に対して周波数変化の小さい高安定なフィルタが得られる。これらの特性は、基板とする圧電単結晶の種類、基板方位 (カット角と伝搬方向)、及び SAW 伝搬モードによって概ね決定され、SAW フィルタの仕様に依

じてこれらの組合せが選択されている。

SAW フィルタに用いられる圧電性基板は、水晶、 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{LiTaO}_3$ などの単結晶である。これらの特性を比較すると、水晶は温度安定性に優れているが圧電性が小さく、水晶上の各種 SAW 伝搬モードの電気機械結合係数も小さい。一方、 $\text{LiNbO}_3$ は大きな圧電性を有しているため、各種 SAW 伝搬モードに対して大きな電気機械結合係数の基板方位が存在するが、温度安定性が良くない。 $\text{LiTaO}_3$ はこれらの中間的な特性を持っているため、SAW フィルタの基板として多用されている。以下に主な SAW 伝搬モードと代表的な基板種類と方位を示す。

#### (1) レイリー型弾性表面波

1885年に、Lord Rayleighは、等方性半無限媒質の表面近傍にエネルギーを集中して伝搬する波動（レイリー波）の存在を理論的に導いた。レイリー波は、伝搬方向に変位を持つ縦波（Longitudinal : L）と、それに垂直な深さ方向に変位を持つ横波（Shear-vertical : SV）の2つの成分から成り、表面近傍では伝搬方向に対して後方に回転する楕円軌道を描くように運動する。半無限媒質が異方性を持つ場合や、圧電性を有する場合であっても、楕円軌道を描くSVとL成分に、表面に平行な横波（Shear-horizontal : SH）成分が結合して伝搬するレイリー型弾性表面波が存在する。その位相速度はL、SH、SVのバルク波のいずれよりも低速であるために、非漏洩モードであり、理論的な伝搬減衰はゼロである。レイリー型SAW用の基板として、バルク波によるスプリアスの少ない $128^\circ\text{Y}$ カットX伝搬 $\text{LiNbO}_3$ やXカット $112^\circ\text{Y}$ 伝搬 $\text{LiTaO}_3$ 基板などが知られ、TV、BSチューナなどのフィルタ用として用いられてきた。

#### (2) 漏洩弾性表面波

波のエネルギーは表面近傍に集中しているが、SVバルク波を基板内部に放射しながら伝搬するモードが、漏洩弾性表面波（Leaky SAW : LSAW）、もしくは疑似弾性表面波（Pseudo SAW : PSAW）と呼ばれる波動である。変位の主成分はSHである。その位相速度はSVバルク波、レイリー型SAWよりも高速であるため、フィルタの高周波化に有利である。バルク波放射による伝搬減衰を有しているが、 $64^\circ\text{Y}$ カットX伝搬 $\text{LiNbO}_3$ や $36\sim 42^\circ\text{Y}$ カットX伝搬 $\text{LiTaO}_3$ 基板などの伝搬減衰がほぼゼロとなる基板方位が見出されている。これらの基板方位では、比較的大きな電気機械結合係数が得られ、移動体通信用途において送信、受信部に必要な比較的広い通過帯域を形成可能であるため多用されている。

#### (3) 縦型漏洩弾性表面波

Lバルク波に近い高速の位相速度を持つ漏洩モードは、縦型漏洩弾性表面波（Longitudinal-type LSAW : LLSAW）、もしくは第2漏洩弾性表面波（Second LSAW）と呼ばれる。変位の主成分はL成分であり、SVバルク波に加えてSHバルク波も基板内部に放射しながら伝搬するために非常に大きな伝搬減衰を有している。一般に、これら2種のバルク波が同時に放射しない、すなわちLLSAWの伝搬減衰がゼロとなる基板方位は存在しない。LLSAWはLSAWよりも更にフィルタの高周波化に有利な伝搬モードであるため、LLSAWの低損失化に関する探索が行われている。 $\text{LiNbO}_3$ では、YカットZ伝搬やXカット $36^\circ\text{Y}$ 伝搬に比較的大きな電気機械結合係数のLLSAWが存在する。

#### (4) ラブ波型弾性表面波

LSAWが伝搬する基板表面に位相速度の遅い薄膜を設けるか、重たい金属膜を用いてIDTを形成することによって、その位相速度をSVバルク波よりも遅くすると、LSAWは非漏洩モードのSAWに移行する。この非漏洩SAWはラブ波型弾性表面波と呼ばれる。LSAWに対して大

きな電気機械結合係数を持つが、伝搬減衰が大きな Y カット近傍の  $\text{LiNbO}_3$  に対してラブ波型弾性表面波を得ると、広帯域なフィルタを構築できることが知られている。

### 3-1-2 SAW フィルタの構成

#### (1) トランスバーサル型フィルタ

トランスバーサル型フィルタは、図 1・1 に示したように、送信側と受信側に IDT を配置してフィルタ特性を得る伝送型フィルタである。各電極指の交差幅を変えるアポダイズ法などの重み付け法を用いて、各電極指の励振強度に重みを付けることにより、振幅特性と位相（遅延）特性を任意に設計できる。このため、TV 用 IF（中間周波数）フィルタや放送機器用フィルタなどに多用されてきた。IDT は励振された SAW が双方向に伝搬するため、送受 IDT 全体では本質的に 6 dB の挿入損失を有する。これを減少させるためには、送信 IDT の両側に受信 IDT を設ける構造や、IDT に単一指向性を持たせた一方向性変換器を用いる方法がある。

#### (2) 共振子型フィルタ

共振子型フィルタは複数の SAW 共振子を組み合わせることでフィルタ特性を得るタイプのフィルタであり、トランスバーサル型フィルタと比較して、より小型化、通過域の低損失化、阻止域の高抑圧化が可能であり、外部整合回路が不要であることから、主に携帯電話などの移動体通信端末用フィルタやデュプレクサ（アンテナ共用器）として多用されている。主な構成としてラダー型フィルタと多重モード（Double Mode SAW : DMS）型フィルタがある。

##### (a) 1 ポート SAW 共振子

図 1・2 に 1 ポート SAW 共振子の構造を示す。IDT から双方向に励振された SAW を IDT の両側に設けたグレーティング反射器で反射させると、SAW の定在波が形成され、共振現象を生ずる。水晶振動子における共振特性と同様に、共振周波数においてインピーダンスが最小となり、それより高い反共振周波数においてインピーダンスが最大となる特性を示す。電気機械結合係数が大きいほど、共振、反共振の周波数差は大きくなり、フィルタを構成した際に広い通過帯域幅が得られる。

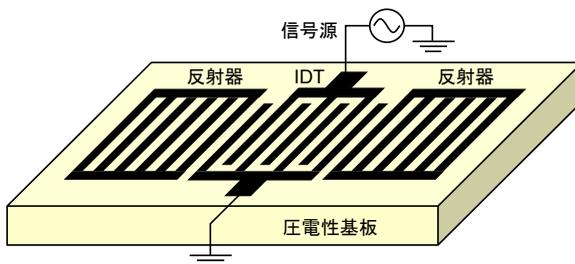


図 1・2 1 ポート SAW 共振子の構造

##### (b) ラダー型フィルタ

ラダー型フィルタの構成は、図 1・3 に示すように、複数個の 1 ポート共振子を梯子状に接続したものである。並列腕の反共振周波数と直列腕の共振周波数を一致させることにより、その周波数付近を通過域とし、直列腕の反共振周波数付近を低域側の阻止域、及び並列腕の共振周

波数付近を高域側の阻止域とするフィルタ特性が得られる。

(c) DMS 型フィルタ

DMS 型フィルタは、2 つ以上の IDT を反射器の間に配置したものである。異なる周波数で共振する複数の共振モード間の結合によりフィルタ特性が得られる。共振モードの共振周波数差が大きいため、広帯域のフィルタに適している。

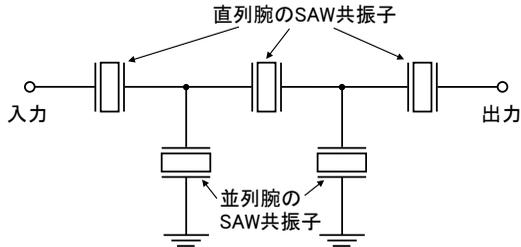


図 1・3 ラダー型フィルタの構成

■参考文献

- 1) 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会(編)：“弾性波デバイス技術,” オーム社, 2004.

## ■9 群-8 編-3 章

### 3-2 BAR フィルタ

(執筆著者：山田 顕) [2015年8月受領]

3 次元的な歪みを持つ媒質中を伝搬する弾性波をバルク波 (Bulk Acoustic Wave : BAW) と呼び、媒質の表面付近のみにエネルギーを集中させて伝搬する弾性表面波 (Surface Acoustic Wave : SAW) とは区別される。ある種の単結晶や強誘電体セラミクス、薄膜材料などでは外部から応力を加えると電荷 (電圧) が発生し、逆に電圧を加えると応力 (歪) が生じる。これを圧電効果と呼び、圧電効果を示す媒質を圧電材料あるいは圧電体という。特定の形状を持つ圧電体に適切な励振電極を設け交流電界を印加すると内部に弾性波が励起され、材質と形状・寸法で決まる特定の周波数で共振を起こす。圧電効果により電気端子から見たインピーダンスが共振点付近で大きく変化することを利用した電子デバイスをバルク波 (圧電) 共振子 (Bulk Acoustic Resonator : BAR) という。また、この共振子を用いて構成したフィルタをバルク波共振子フィルタ (BAR フィルタ) と呼ぶ。

BAR フィルタに用いられる圧電単結晶には水晶、 $\text{LiTaO}_3$  (タンタル酸リチウム)、 $\text{LiNbO}_3$  (ニオブ酸リチウム)、 $\text{KNbO}_3$  (ニオブ酸カリウム) など、強誘電体セラミクスには  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  (チタン酸ジルコン酸鉛) 系や  $\text{PbTiO}_3$  (チタン酸鉛) 系など、圧電薄膜材料には  $\text{AlN}$  (窒化アルミニウム) や  $\text{ZnO}$  (酸化亜鉛) などがある。用いられる振動モードは周波数によって異なり、LF 帯では板の屈曲振動や長さ方向振動あるいは棒の伸び振動やねじれ振動、MF 帯では円板や角板の歪み振動、HF 帯以上では厚みたて振動や厚みすべり振動である。以下では HF 帯から UHF 帯で用いられる厚み振動とその帯域通過型フィルタへの応用について述べるが、基本原理はほかの振動モードでも同じである。

#### 3-2-1 厚み共振子とそのフィルタへの応用

図 2・1(a)のように圧電板の表裏両面に電極を設け交流信号を印加すると、自発分極の向きに応じて厚さ方向に伝搬する縦波あるいは横波が励起され、板厚で決まる周波数で厚み振動の共振が起こる。これを利用したものを (圧電) 厚み共振子という。

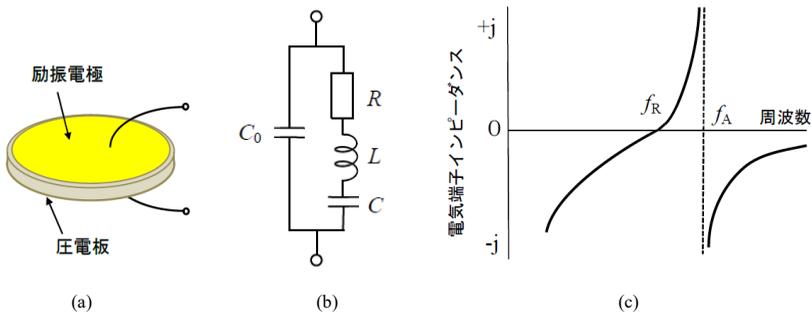


図 2・1 圧電共振子の構造(a)と共振点付近での近似等価回路(b)及び電気端子インピーダンス特性(c)

板厚の中央の面に関する分極分布と印加電界の対称性から、通常の圧電板では板厚が半波長となる基本波とその奇数次高調波のみが圧電的に励振される。一般に圧電共振子はある次数の

振動モードの共振周波数付近で近似的に図2・1(b)のような電気的等価回路で表すことができる。ここで、 $C_0$ は制動容量、 $C$ は等価容量、 $L$ は等価インダクタンス、 $R$ は共振抵抗である。通常 $R$ はあまり大きくないので、これを無視すると共振子の電気端子インピーダンスは純虚数（リアクタンス分のみ）となり、その周波数特性は図2・1(c)ようになる。回路の直列共振周波数 $f_R$ 及び並列共振周波数（反共振周波数） $f_A$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad f_A = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{LCC_0}{C+C_0}}} \tag{2・1}$$

$C_0/C$ は容量比と呼ばれ、この値が小さいものほど圧電効果が大きく、電気的エネルギーと機械的エネルギーの相互変換能力を表す電気機械結合係数が大きい。 $f_R$ と $f_A$ の間ではインピーダンスが誘導性となるので、この区間を通過域とする帯域通過型フィルタが古くから使用されてきた。

一例として2個の共振子を用いたヤーマン形フィルタ回路<sup>1),2)</sup>と各素子のリアクタンス及び挿入損の周波数特性の概要を図2・2に示す。この構成では共振子 $R_{cb}$ の反共振周波数 $f_{Ab}$ と共振子 $R_{ca}$ の共振周波数 $f_{Ra}$ が一致するように設計され、概ね $f_{Rb} \sim f_{Aa}$ が通過域となる。容量比の小さい（電気機械結合係数の大きい）共振子を用いるほど $f_R$ と $f_A$ の周波数の開きが大きくなり、フィルタの通過帯域幅が広がる。また、通過帯域内での挿入損失は共振子の $Q$ 値が大きいほど（共振抵抗 $R$ が小さいほど）小さくなる。

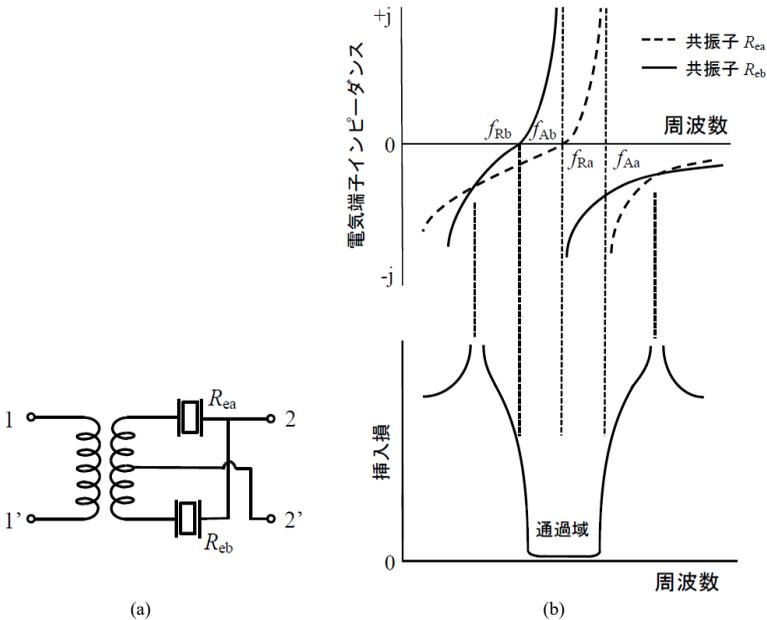


図2・2 ヤーマン型フィルタの構成(a)と各素子のリアクタンス特性(b)及びフィルタ特性(c)

### 3-2-2 エネルギー閉じ込め振動とモノリシック・フィルタ

図 2・3 のように圧電板の一部分に電極を設けて厚み振動を励振すると振動エネルギーが電極部分に閉じ込められ、無電極部分では距離とともに振動振幅が指数関数的に減衰する現象が起こる。これをエネルギー閉じ込めと呼ぶ<sup>3)~6)</sup>。エネルギー閉じ込め現象は圧電板に沿って伝わる厚み振動波の伝搬定数と周波数の関係を示す分散曲線と密接な関係がある。しゃ断周波数付近での厚み振動波の分散曲線の概要を図 2・4 に示す。縦軸は角周波数 $\omega$ 、横軸は板に沿った方向の伝搬定数 $k$ で、横軸の負の部分に $k$ の虚数部を展開して示してある。電極の質量負荷効果や圧電反作用効果により電極付加時のしゃ断周波数 $\omega_0$ は無電極時の $\omega_0^*$ よりもわずかに低下し、分散曲線も破線から実線のようにシフトする。図 2・3 のような部分電極構造で $\omega_0$ と $\omega_0^*$ の間で励振された厚み振動波は中央の電極部分では $k$ が実数となり横方向に伝搬するが、周辺の無電極部分では $k$ が虚数となって指数関数的に減衰する。板厚に対して電極幅が大きくなると非調和振動モードと呼ばれる厚み振動波の横方向定在波が複数個生じようになる。エネルギー閉じ込め振動では板の輪郭振動との結合に起因する不要振動（スプリアス振動）が抑えられ、板の周辺部分を支持しても主振動に影響がなく高い共振尖鋭度が得られる、などの特徴がある。

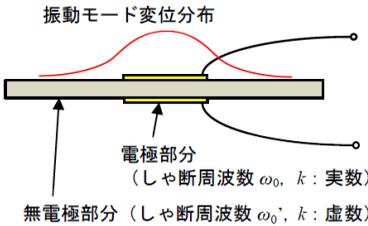


図 2・3 エネルギー閉じ込め型振子の構成

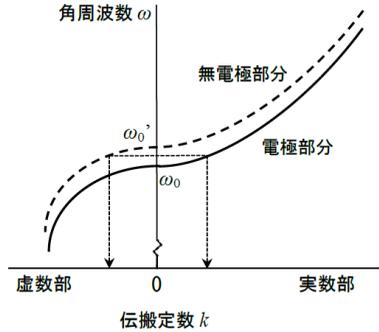


図 2・4 圧電板における厚み振動波の分散曲線

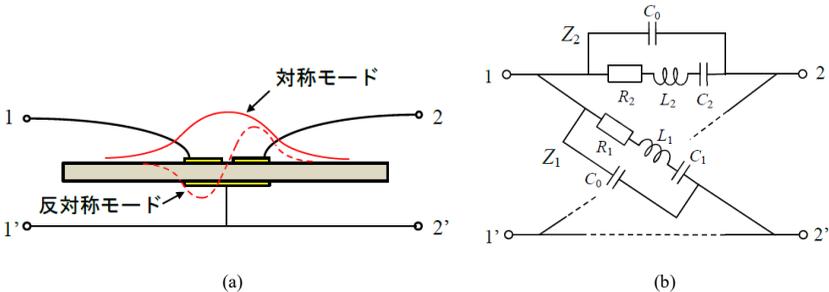


図 2・5 エネルギー閉じ込め型二重モードフィルタの構成(a)と対称格子型等価回路(b)

図 2・5(a)のように1枚の圧電板上に2つのエネルギー閉じ込め共振子を作り、これらを互いに近接させると両者の間に音響的な結合が起こる。その結果生じる中央に対して対称なモード

と反対称なモードを利用すると二重モードフィルタが構成される<sup>7)~9)</sup>。フィルタの等価回路は図 2・5(b)のような対称格子型回路で与えられ、 $Z_1$  及び  $Z_2$  はそれぞれ対称モード及び反対称モード共振子のインピーダンスを表す。通常は対称モードの反共振周波数と反対称モードの共振周波数が一致するように設計される。一定の係数を除けば  $Z_1, Z_2$  はそれぞれ図 2・2(a)のヤーマン型フィルタの共振子  $R_{cb}$  及び  $R_{ca}$  のインピーダンスに対応するので、得られる特性は図 2・2 の (b)及び(c)とほぼ同じである。ヤーマン型フィルタと同じ機能のものを 1 枚の圧電基板上に構成できることから、これをモノリシック (Monolithic: 1 枚板の) フィルタという。モノリシック・フィルタは非常に多く使用されており、特に水晶基板を使ったものは MCF (Monolithic Crystal Filter) と呼ばれている。

### 3-2-3 FBAR

厚み共振子は超高周波になると板厚が極端に薄くなり製作が困難になるため、VHF~UHF 帯でのフィルタには専ら弾性表面波 (SAW) フィルタが用いられてきた。一方、超高周波で動作するバルク波共振子<sup>10)</sup>として図 2・6 に示す圧電薄膜共振子 (Film Bulk Acoustic Resonator: FBAR) が 1980 年代に考案されている<sup>11)~13)</sup>。作製方法としてはシリコン (Si) 基板上に下部電極、圧電薄膜、上部電極を形成し、最後に共振子となる部分の Si 基板を異方性ウエットエッチングまたは反応性のイオンエッチングなどで取り去る方法 (図 2・6(a))、あるいは下部電極の下に犠牲層と呼ばれる除去可能な層を設けておき、最後にこれを取り去って空隙を作る方法<sup>14)</sup> (図 2・6(b)) などがあ。圧電薄膜の膜厚は数  $\mu\text{m}$  から数十  $\mu\text{m}$  であり、基本共振周波数は数百 MHz から 10 GHz 帯に及ぶ。FBAR は Si 基板上に作製できるため半導体集積回路との整合性が良く、耐電力性や静電耐圧特性などの面でも SAW フィルタより有利なことから注目されている。FBAR を用いた分割電極によるエネルギー閉じ込め型二重モードフィルタの構成も可能であるが、共振周波数のわずかに異なる共振素子を直列腕と並列腕に配置したラダー (梯子) 形のフィルタ<sup>15)</sup>も実用化されている。その基本構成例は図 2・7 のようであり、直列腕共振子

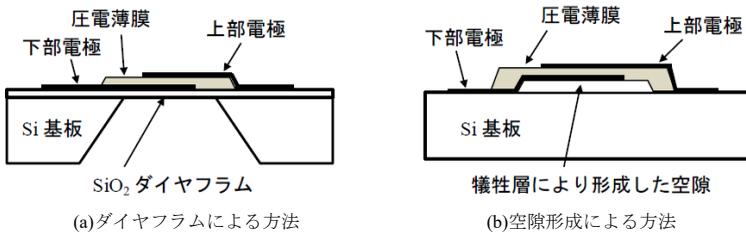


図 2・6 FBAR の構造

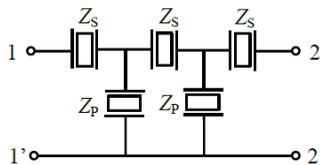


図 2・7 ラダー (梯子) 形のフィルタの基本構成例

$Z_s$  の共振周波数と並列腕共振子  $Z_p$  の反共振周波数を一致させることで帯域通過型フィルタ特性が得られる。

### 3-2-4 SMR

超高周波用の共振子<sup>10)</sup>として SMR (Solidly Mounted Resonator) と呼ばれる図 2・8 のような構造の共振子が考案されている<sup>16)~18)</sup>。これは電極に挟まれた圧電薄膜と Si 基板との間に数層の誘電体薄膜を積層した構造を持つ。誘電体薄膜層は固有音響インピーダンスの高い層と低い層が交互に積み重ねられており、厚さはいずれも動作中心周波数で 4 分の 1 波長になるよう設定される。圧電薄膜で励振された音波が誘電体薄膜層を通して Si 基板へ向かう際に各境界面で少しずつ反射と透過が起こる。このうち反射波は互いに強め合い透過波は弱め合うため、波のエネルギーは圧電薄膜付近に閉じ込められ Si 基板へは殆ど到達しない。この構造の共振子は Si 基板に固着されているにもかかわらず基板の影響を受けないことから表記のような名前が付けられている。SMR で音響的結合を利用しフィルタを構成する場合、2 つの共振子を横方向に近接配置する通常の方法に加え、誘電体多層反射膜の中ほどにも圧電薄膜を設けて膜厚方向での結合を利用する方法<sup>19)</sup>も可能である。

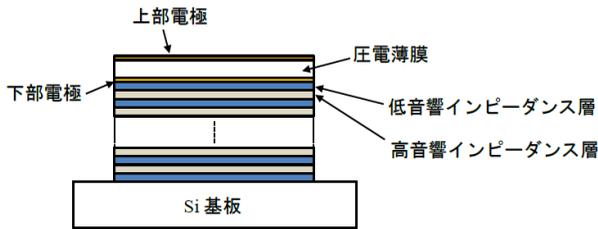


図 2・8 SMR の構造

#### ■参考文献

- 1) 八鍬和夫, 永松武夫, 柳 昌憲: “ろ波回路,” 日刊工業新聞社, pp.198-207, 1971.
- 2) 中村信良(編): “音響工学講座 “超音波,” コロナ社, pp.146-149, 2001.
- 3) W. Shockley, D.R. Curran, and D.J. Koneval: “Energy Trapping and Related Studies of Multiple Electrode Crystals,” Proc. 17th Ann. Symp. on Frequency Control, pp.88-126, 1963.
- 4) 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会(編): “弾性波素子技術ハンドブック,” オーム社, pp.82-86, 1991.
- 5) 超音波便覧編集委員会: “超音波便覧,” 丸善, pp.575-579, 1999.
- 6) 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会(編): “弾性波デバイス技術,” オーム社, pp.182-188, 2004.
- 7) Y. Nakazawa: “High Frequency Crystal Electromechanical Filters,” Proc. 16th Ann. Symp. on Frequency Control, pp.373-390, 1962.
- 8) 尾上守夫, 十文字弘道: “エネルギーとじこめ形圧電共振子の解析,” 電気通信学会誌, vol.48, pp.1574-1581, 1965.
- 9) 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会(編): “弾性波素子技術ハンドブック,” オーム社, pp.86-89, 1991.
- 10) 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会(編): “弾性波デバイス技術,” オーム社, pp.197-216, 2004.
- 11) T.W. Grudkowski, J.F. Black, T.M. Reeder, D.E. Cullen, and R.A. Wagner: “Fundamental-mode VHF/UHF miniature acoustic resonators and filters on silicon,” Appl. Phys. Lett., 37, pp.993-995, 1980.

- 12) K.M. Lakin and J.S. Wang : "UHF composite bulk wave resonators," Proc. 1980 IEEE Ultrasonics Symp., pp.834-837 (1980)
- 13) 中村 徳良, 清水 洋 : "異方性エッチ Si 基板を用いた ZnO 膜低次オーバートーン厚み共振子," 日本音響学会講演論文集, pp.127-128, 昭和 55 年 10 月.
- 14) R. Ruby, P. Bradley, J.D. Larson, and Y. Oshmyansky : "PCS 1900 MHz Duplexer Using Thin Film Bulk Acoustic Resonators (FBARS)," Electronics Letters, vol.35, no.10, pp.794-795, 1999.
- 15) T. Nishihara, T. Yokoyama, T. Miyashita, and Y. Satoh : "High Performance and Miniature Thin Film Bulk Acoustic Wave Filters for 5 GHz," Proc. 2002 IEEE Ultrasonics Symp., pp.969-972, 2002.
- 16) K.M. Lakin, K.T. McCarron, and R.E. Rose : "Solidly Mounted Resonators and Filters," Proc. 1995 IEEE Ultrasonics Symp., pp.905-908, 1995.
- 17) G.D. Mansfield and S.G. Alekseev : "Theory and Numerical Analysis of Bulk Acoustic Wave Multilayer Composite Resonator Structure," Proc. 1997 IEEE Ultrasonics Symp., pp.891-894, 1997.
- 18) K. Nakamura and H. Kanbara : "Theoretical Analysis of a Piezoelectric Thin Film Resonator with Acoustic Quarter-Wave Multilayers," Proc. 1998 IEEE International Frequency Control Symp., pp.876-881, 1998.
- 19) K.M. Lakin, J. Belsick, J.F. McDonald, and K.T. McCarron : "High Performance Stacked Crystal Filters for GPS and Wide Bandwidth Applications," Proc. 2001 IEEE Ultrasonics Symp., pp.833-838, 2001.

## ■9群-8編-3章

### 3-3 圧電トランス

(執筆者：工藤すばる) [2012年7月 受領]

圧電トランスは、圧電振動子に入出力用の2組の電極を取り付け、低インピーダンスの1次側駆動端子で振動子をその共振周波数近傍で駆動し、2次側で伝達された振動を高インピーダンスの2次側出力端子から電気エネルギーとして取り出すデバイスで、その電氣的インピーダンス変換機能に着目して昇圧を行うものである。圧電トランスは、従来の巻線型電磁トランスと比較すると、(1)巻線がないため構造が単純であり、小型化、薄型化が可能である。(2)巻線の絶縁問題がなく、出力側の短絡事故に対して不燃性である。(3)共振型で機械的 $Q$ 値が高いため昇圧比が高くとれる、などの特徴を有しており、ノートパソコンのバックライト用高電圧電源、空気清浄機用やレーザープリンタ用などの高電圧小電流電源として開発・実用化されている。更に、DC-DCコンバータ用やAC-DCコンバータ用などの低電圧大電流電源としての研究開発も行われている<sup>1)</sup>。

#### 3-3-1 構造と振動モード

図3・1は、圧電トランスの原型となるRosen型圧電トランスの構造と振動モードである<sup>2)</sup>。薄い圧電セラミックス板の半分を厚さ方向に分極し、上下面に電極を形成しトランスの1次側

(駆動部)として利用する。また、

圧電板のほかの半分は長さ方向に分極し、端部に電極を形成しトランスの2次側(発電部)として使用する。利用する振動

モードは、長さ方向が半波長に相当する1次振動モードあるいは1波長に相当する2次振動モードなどがある。圧電トランスは、通常その共振周波数付近で

駆動するため、高次モードを利用するに従い動作周波数は高くなる。圧電トランスの支持と電極の取り出しは振動モード分布で変位がゼロとなる位置(振動の節)で行う。1次振動モードで

動作させる場合は長さのほぼ中央部分、2次振動モードでは両端からそれぞれ1/4の部分が振動変位がゼロとなる。しかし、

振動の節では発生応力が最大となるため、種々の支持方法が検

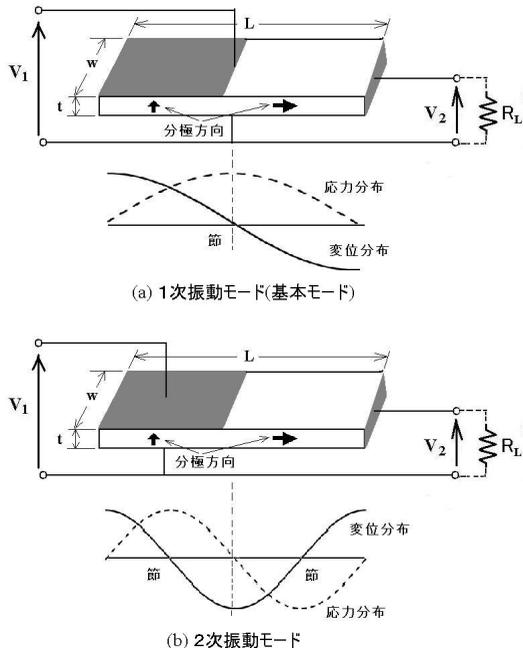


図3・1 Rosen型圧電トランスの構造と振動モード

討されている.

### 3-3-2 等価回路

圧電トランスは、一つの機械振動系に入出力用の電極を配置した構成であり、集中定数による共振周波数付近の等価回路は図3・2で表される。ここに、 $C_{d1}$ 、 $C_{d2}$ は1次側（駆動部）及び2次側（発電部）の制動容量、 $m$ 、 $r$ 、 $s$ は振動子の等価質量、等価機械抵抗、等価スチフネス、 $A_1$ 、 $A_2$ は入力側及び出力側の電気機械変換の力係数である。それぞれの等価回路定数は、圧電トランスの構造や使用する圧電材の材料定数などによって定まり、これらの定数を用いて圧電トランスの性能解析が行われている<sup>3)</sup>。

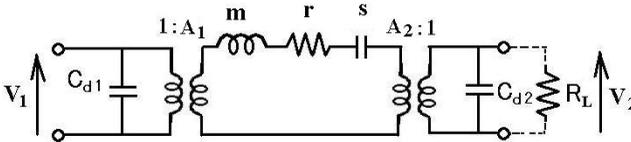


図3・2 圧電トランスの等価回路

### 3-3-3 動作特性

#### (1) 昇圧比

圧電トランスの無負荷時 ( $R_L = \infty$ ) の昇圧比  $V_2/V_1$  は近似的に次式で表される。

$$\frac{V_2}{V_1} \propto k_{31}k_{33}Q \frac{L}{t} \quad (3 \cdot 1)$$

ここに、 $L$ 、 $t$ 、 $Q (= \omega_0 m/r)$  はそれぞれ振動子の長さ、厚さ及び共振鋭度で、 $k_{31}$ 、 $k_{33}$  はそれぞれ横効果及び縦効果の電気機械結合係数である。したがって、 $k_{31}$  と  $k_{33}$  の積が大きく、 $Q$  値の大きな振動子を用いれば、昇圧比の大きな圧電トランスを構成することができる。なお、圧電トランスの設計指針は多数報告されており、昇圧比に加え帯域幅を考慮した圧電トランスの性能指数 (Figure of Merit) も提案されている<sup>4)</sup>。

#### (2) 周波数及び負荷特性

圧電トランスは共振型デバイスであり、その昇圧比は動作周波数や負荷インピーダンスによって変化する。昇圧比は、振動子の共振周波数付近で駆動した場合に最大となり、2次側インピーダンス  $1/(\omega C_{d2})$  に対して負荷インピーダンス  $R_L$  が十分に大きい場合 ( $R_L > 1/(\omega C_{d2})$ )、高効率で大きな昇圧比が得られる。また、負荷インピーダンスが低くなると昇圧比が最大となる周波数は低下し、昇圧比の値も低くなる。

#### (3) 発熱及び破壊特性

圧電振動子を大電力で長時間駆動すると、発熱現象や機械的疲労・破壊現象を伴うことが知られている。圧電トランスの発熱 (温度上昇) は、誘電損失や振動損失が主な要因であり負荷インピーダンスに依存し、大振幅駆動で出力が大きいほど発熱も大きくなる。これらの特性を考慮した設計指針も報告されており<sup>5)</sup>、大電力動作に適した単結晶圧電トランスの研究も行われている<sup>6)</sup>。

## ■参考文献

- 1) 中村信良(監修)：“圧電材料の高性能化と先端応用技術,” サイエンス&テクノロジー, pp.453-465, 2007.
- 2) C.A. Rosen：“Ceramic transformers and wave filters,” Proc. Electronic Component Sym., pp.205-211, 1957.
- 3) 若月 昇, 上田政則：“幅すべり振動モード圧電トランスの動作解析,” 信学論 (C-I), vol.J77-C-I, no.10, pp.562-568, 1994.
- 4) 広瀬精二, 清水 洋：“非対称フィルタとしての圧電トランスの設計理論,” 信学論(A), vol.J74-A, no.3, pp.323-331, 1991.
- 5) 要 祐一, 伊勢悠紀彦：“圧電セラミックトランス用素子の一考察,” 音響誌, vol.32, no.8, pp.470-479, 1976.
- 6) 中村信良, 安達義徳：“ニオブ酸リチウム単結晶を用いた圧電トランス,” 信学論(A), vol.J80-A, no.10, pp.1694-1698, 1997.

## ■9 群-8 編-3 章

### 3-4 圧電ジャイロ

(執筆者：工藤すばる) [2012年7月 受領]

圧電ジャイロは、「振動している物体に回転角速度を印加すると振動方向と直角方向にコリオリ力が発生する」という力学現象を利用して、振動の駆動と検出を圧電的に行う振動式の角速度センサのことである<sup>1)</sup>。圧電ジャイロは、従来のロータ回転式ジャイロと比較して、ベアリングなどの摩耗部分がないために長寿命で起動時間が短い、構造が簡単であるため小型化に適しており低消費電力で安価である、電源及び角速度出力はともに直流である、などの特徴を有している。このため圧電ジャイロは、車両のナビゲーションや姿勢制御、ビデオカメラやデジタルカメラの手振れ検知、パソコンの周辺機器制御などのキーデバイスとして各種構造・構成のものが開発・実用化されるようになった<sup>1)2)</sup>。このような圧電ジャイロは、その特徴を生かしながら MEMS センサとして更なる小型化、高性能化が期待されている。

#### 3-4-1 構造と等価回路

図 4・1 は、横振動双共振音片を用いた圧電ジャイロの一構造例である。双共振音片が  $x$  軸方向にその第 1 次共振周波数  $f_{0x}$  ( $= \omega_{0x}/2\pi$ ) で横振動している状態で、 $z$  軸の回りに回転角速度  $\Omega_0$  が印加されると、その振動方向と直角の  $y$  軸方向にコリオリ力が発生し、印加角速度  $\Omega_0$  に比例した同一周波数の横振動が励振される。この振動を圧電的に検出し駆動信号で同期検波することで、角速度の大きささと方向が検知可能な圧電ジャイロが実現される。この双共振音片の回転座標系における運動方程式を近似表示すると、図 4・2 の等価回路が得られる。駆動側の回路与検出側の回路がコリオリ力によってジャイロータ結合した回路となるのが特徴である。ここに、 $A_i, C_d$  ( $i=x, y$ ) は駆動側 ( $i=x$ ) 及び検出側 ( $i=y$ ) の圧電磁器の力係数及び制動容量である。この等価回路を用いて、圧電ジャイロの特性の解析及び性能向上を計る設計指針を考察することができる。

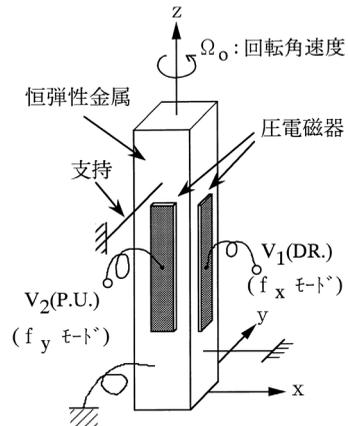


図 4・1 双共振音片ジャイロ

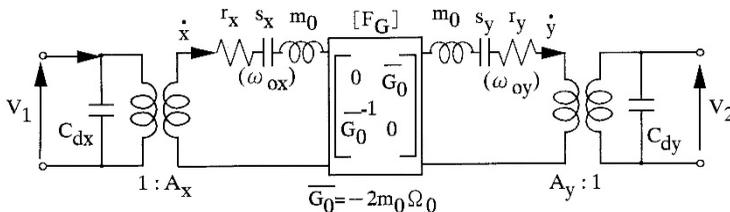


図 4・2 等価回路

### 3-4-2 特性と設計指針

#### (1) 感度

図 4・2 の等価回路より圧電ジャイロの設計指針となる Figure of Merit (F.M) が導出できる<sup>3)</sup>。F.M として入出力電圧比 ( $V_2/V_1$ )、感度  $S = |V_2/\Omega_0|$  を定義すると、その近似式は

$$\frac{V_2}{V_1} \cong j2 \left( \frac{A_x}{A_y} \right) \left( \frac{Q_x}{\omega_{0x}} \right) \left( \frac{Q_y}{\gamma} \right) \Omega_0 \quad S \cong \left| \frac{V_2}{\Omega_0} \right| \cong 2A_x A_y Q_y \left( \frac{Q_x}{\omega_{0x}} \right) \left( \frac{1}{C_{d_y} S_y} \right) V_1 \quad (4 \cdot 1)$$

と表される。ここに、 $Q_i$  ( $i=x, y$ ) は共振尖鋭度、 $\gamma$  は検出側の容量比で駆動角周波数  $\omega_d$  を  $\omega_d = \omega_{0x} = \omega_{0y} \sqrt{1 + 1/\gamma}$  と設定している。式(4・1)より圧電ジャイロの高感度化のためには、共振角周波数は低く共振尖鋭度が大きいこと、更に駆動及び検出側の力係数はともに大きくすることなどが設計指針となる。

#### (2) 応答特性

一般の回転角速度は時間とともに変化する。回転角速度が正弦波的に  $\Omega(t) = K_\Omega \cos(2\pi f_\Omega t)$  と変化する場合、圧電ジャイロの同期検波出力  $V'_2$  もそれに追従して正弦波的に変化する。しかし、回転周波数  $f_\Omega$  が大きくなると検波出力の振幅が変化し、 $\Omega(t)$  に対する位相遅れが生じる。 $f_\Omega$  に対する検波出力の振幅及び位相遅れ特性を圧電ジャイロの周波数応答特性と呼ぶ。図 4・3 は圧電ジャイロの周波数応答特性の実測例である<sup>4)</sup>。要求範囲内では振幅は一定で位相遅れがないことが望まれる。この平坦範囲は車両ナビゲーション用あるいはビデオカメラの手振れ補正用では 0~10 Hz あるいは 20 Hz 程度必要とされる。この範囲は図示のように圧電ジャイロの駆動側と検出側の共振周波数の差  $\Delta f$  によって可変できる。 $\Delta f$  値を小さくすると出力の振幅は大きいが平坦範囲は狭く位相遅れも大きい。また、 $\Delta f$  値を大きく設定すると平坦範囲は広がり位相遅れは小さくなるが振幅も小さくなる。したがって、要求値 0 ~  $f_\Omega$  の範囲内で検波出力が平坦になるように  $\Delta f$  値を設定することが設計指針となる。

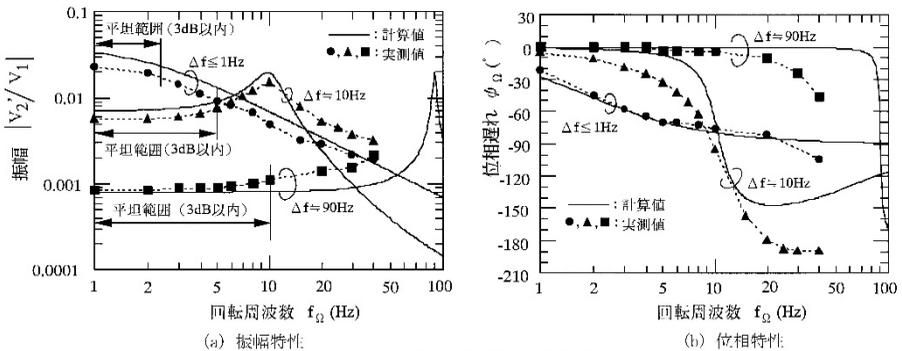


図 4・3 周波数応答特性

### (3) 漏れ出力

実際の出力信号は、検出したいコリオリ力による出力成分 $V_Q$ と駆動・検出間の各種結合による漏れ出力成分  $V_N$  のベクトル和となる。漏れ出力発生の要因となる結合には、圧電磁器の接着ずれによる余剰力係数成分、双共振子の構造の非対称性、残留歪や支持に起因する機械的結合、静電的結合などがある。これらの結合を考慮した等価回路も得られており、設計指針ならびに結合因子の特性に与える影響量は数値計算によって求めることができる<sup>5)</sup>。

#### ■参考文献

- 1) 近野 正, 菅原澄夫, 工藤すばる: “圧電形振動ジャイロスコープ角速度センサ,” 信学論(C), vol.J78-C-I, no.11, pp.547-556, 1995.
- 2) 中村億良(監修): “圧電材料の高性能化と先端応用技術,” サイエンス&テクノロジー, pp.384-406, 2007.
- 3) 工藤すばる, 近野 正: “圧電形振動ジャイロスコープの感度と時定数の設計,” 音響誌, vol.51, no.11, pp.836-844, 1995.
- 4) 工藤すばる: “圧電形振動ジャイロスコープの周波数応答特性及び過渡応答特性,” 音響誌, vol.52, no.5, pp.311-319, 1996.
- 5) 菅原澄夫, 近野 正, 工藤すばる, 吉田登美男: “圧電形振動ジャイロスコープの漏れ出力の等価回路考察,” 信学論(A), vol.J76-A, no.3, pp.263-272, 1993.

## ■9群-8編-3章

### 3-5 圧電アクチュエータ

(執筆著：田村英樹) [2012年6月 受領]

熱や光などの各種供給エネルギーを最終的に機械的な変位や力に変換して対象物を動かすアクチュエータのうち、圧電方式は圧電材料の逆圧電効果を用いて電気入力を直接機械出力に変換できる。これはシンプルな構造で小型化が容易であり、その体積に比して発生力が大きく動作速度は高速であり、微小変位ゆえに精密動作に向く特長を有する。

圧電性の発現は結晶の非対称性によるため、使用する材料の異方性を考慮する必要がある。代表的な圧電セラミックスは正方晶系 (Tetragonal System) 4mm に属し、この場合には分極方向  $P$  (直交座標 1-2-3 軸系における、3 軸方向) に対して電界  $E$  から生じる歪み  $S$  の種類を図 5・1 に示す。インデックスに工学的記法を用いると、分極方向に対して電界  $E_3$  と歪み方向  $S_3$  がいずれも平行となる縦効果 ( $d_{33}$ )、これに対して電界  $E_3$  とに直交した歪み  $S_1$  あるいは  $S_2$  の横効果 ( $d_{31}$ )、ならびに分極方向に対して電界が直交した際に生じる剪断歪み  $S_4, S_5$  に関するすべり効果 ( $d_{15}$ ) となる。4mm の圧電体では一般に  $|d_{15}| > |d_{33}| > |d_{31}|$  である。ほかの晶系では圧電性が活性となる方向が異なり、特に単結晶を利用する場合にはデバイスに適した印加電界と歪みの発生方向が得られるように結晶からの切り出し方位を選択する。なお、実際の設計においては弾性的な異方性による縦と剪断などの結合にも注意を要する。

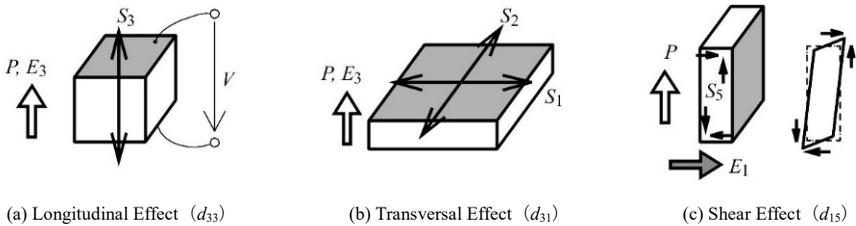


図 5・1 圧電セラミックスの印加電界と、発生する歪みの種類

これらの圧電アクチュエータは、静的な利用時には変位を保持するために電圧を印加し続ける必要があるが、その際の電流は僅かであるのでエネルギー消費は少ない。しかしながら、伸縮に際してはヒステリシス特性を有しており、繰り返し再現性を用いる場合には、動的には電流、静的には電荷量による制御のほか、絶対精度を求める場合には変位センサのフィードバックを要する。また、材料によっても異なるので、ヒステリシスの小さな圧電セラミックスあるいは単結晶圧電材料など適切な材料選択が必要である。

圧電材料による機械出力はその発生力に対して変位量が小さく、また必要変位を得るために高電圧を要する。そのために電極間距離を狭くして低電圧化を図るとともに、微小変位要素を積み重ねることで全体として大きな変位量を得るために図 5・2(a) に示す積層圧電アクチュエータ (MLPA) が用いられる。また特に大きな機械的パワーを発生させる際に過大な伸張応力発生による圧電体の自己破壊を防ぐために図 5・2(b) の金属ブロックとボルトで予圧縮力を与えておくボルト締めランジュバン型トランスデューサ (BLT) も多用される。以上は縦効果を用いた方式であるが、あるいは発生力としては比較的小さいものの金属などの弾性体と貼り合わせ

て横効果を用いる図 5・2(c)のユニモルフや図 5・2(c)の両面にセラミックスを設けたバイモルフ構造もその簡素な構造から、走査型プローブ顕微鏡のカンチレバーへの応用をはじめ代表的な構造である。圧電薄膜技術による MEMS にも適している。また、バイモルフ構造では図 5・2(d)のように上下セラミックスの分極と電界方向の組合せによって軸方向変位と屈曲変位を選択的に利用することもできる。

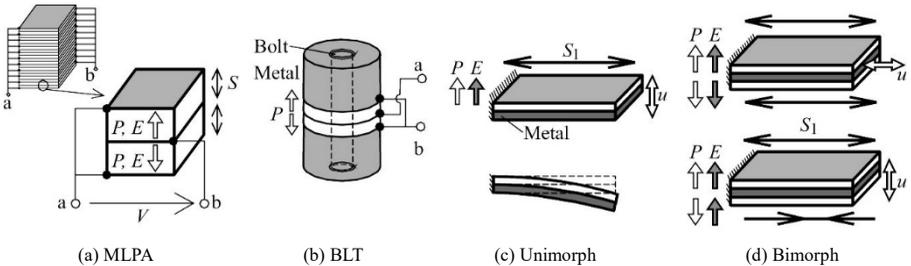


図 5・2 圧電アクチュエータの基本構成

このほかにも、すべり効果を用いて屈曲を起こす図 5・3(a)の構造はインクジェットプリンタのインク室容積を変化させてインクを吐出させるプリンタヘッドに用いられている。微細な加工により壁面を薄くして電極間距離の縮小に加えて機械的な剛性も下げて変位を得やすくしている。また屈曲変位をユニモルフ構造のような貼り合わせを用いずにセラミックス単板で得るために図 5・3(b)の方式も可能である。これは圧電セラミックスでは直流高電界によって分極を与えられることから、セラミックス表面に交差指電極を形成して分極と駆動を行うと、表面ほど分極と駆動電界が強い傾斜特性となるため屈曲変位が得られる。圧電体だけでは MLPA を用いたとしても変位が不足する場合には、図 5・3(c)の原理図に示すように、金属などの構造体によりテコの原理を用いて出力点で大きな変位を得る、変位拡大機構の設計が必要となる。同様に構造体や機構と組み合わせて変位方向の変換や多自由度アクチュエータも構成される。

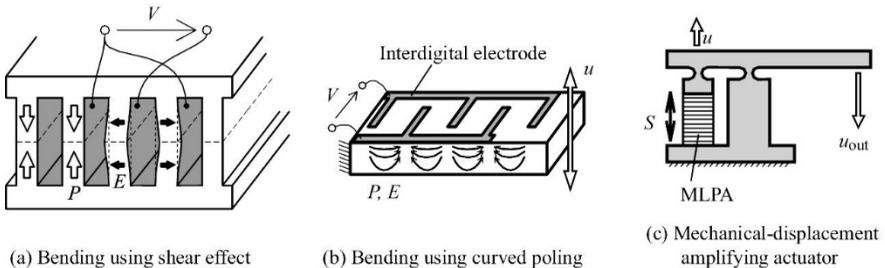


図 5・3 圧電アクチュエータのその他の構成例

#### ■参考文献

- 1) 富川義朗(編著): “超音波エレクトロニクス振動論”, 朝倉書店, 1998.
- 2) K. Uchino, J.R. Giniewicz (内野研二, 石井孝明(共訳)): “マイクロメカトロニクス-圧電アクチュエータを中心に-”, 森北出版, 2007.

- 3) 日本工業技術振興協会固体アクチュエータ研究部会：“精密制御用ニューアクチュエータ便覧,” フジテックノシステム, 1994.

## ■9 群-8 編-3 章

---

### 3-6 超音波モータ

1 群 10 編 超音波信号処理 7 章 7-5 節参照.