

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

修士論文

LiNbO₃ 単結晶を用いた
精密位置決め用アクチュエータの研究
LiNbO₃ Single Crystal Actuator
for Precise Positioning System

2007年2月7日提出

指導教員 森田 剛 助教授



学生証番号 56809

松波 豪

目次

第1章 序論	4
1.1 はじめに	5
1.2 圧電体の基本事項	6
1.2.1 圧電効果とその原理	
1.2.2 圧電基本式と圧電定数	
1.2.3 電気機械結合係数と機械的品質係数	
1.3 圧電素子を用いた応用例	15
1.3.1 超音波モータ	
1.3.2 インクジェットプリンタ	
1.3.3 走査型トンネル顕微鏡 (STM)	
1.4 圧電単結晶と圧電セラミックの違い	18
1.4.1 圧電セラミック (PZT) の特徴	
1.4.2 圧電単結晶 LiNbO_3 の特徴とこれまでの応用例	
1.4.3 アクチュエータとしての圧電単結晶 LiNbO_3	
1.5 本論文の研究目的	26
1.6 本論分の構成	27
第2章 積層型圧電アクチュエータの設計と作製	28
2.1 はじめに	29
2.2 結晶カット角の最適化	30
2.2.1 圧電材料の異方性	
2.2.2 圧電縦効果に最適なカット角の導き方	
2.3 積層型 LiNbO_3 単結晶圧電アクチュエータの試作	37
2.3.1 積層型圧電アクチュエータ	
2.3.2 積層アクチュエータの作製	
2.4 試作アクチュエータの特性の見積もり	40
2.5 蒸着によるアクチュエータ作製	41
2.5.1 目的	
2.5.2 LiNbO_3 ウエハへの Cr, Au 蒸着	
2.5.3 アクチュエータの作製	

第3章 試作アクチュエータの圧電振動特性の評価	44
3.1 はじめに	45
3.2 圧電アクチュエータのモデル化	45
3.2.1 電気系と機械系の対応	
3.2.2 共振付近で近似した等価回路	
3.2.3 アドミタンス円による等価回路定数の算出法	
3.3 試作アクチュエータの圧電振動特性の評価.....	49
3.3.1 アドミタンス曲線と共振周波数	
3.3.2 アドミタンスループによる等価回路定数の導出	
3.3.3 インピーダンスアナライザによる等価回路定数測定	
第4章 試作アクチュエータの線形性の評価	53
4.1 実験の目的.....	54
4.2 実験方法	54
4.2.1 実験装置	
4.2.2 位相遅れの補正	
4.3 変位 - 電圧特性の線形性の評価.....	61
4.4 圧電変位の周波数依存性の検証.....	63
4.5 アクチュエータの最大変位	67
第5章 原子間力顕微鏡への実装	69
5.1 はじめに	70
5.2 原子間力顕微鏡の原理	70
5.3 設計および組み立て.....	72
5.4 ウォーカの動作実験.....	73
5.4.1 ウォーカの説明	
5.4.2 ウォーカ動作実験	
5.5 圧電定数測定	75
5.5.1 圧電定数測定の必要性和原理	
5.5.2 電流-電圧変換回路	
5.5.3 フィードバック制御回路	
5.5.4 実験概略	
5.5.5 測定の結果と検証	

第6章 結論	81
6.1 本研究のまとめ	82
6.2 将来の課題と展望	83
参考文献	84
謝辞	
付録 原子間力顕微鏡設計図	

第 1 章

序論

1.1 はじめに

圧電材料とは、結晶に応力を加えると電気分極が生じ（圧電効果）、また電界を印加すると結晶に応力あるいは歪みが生じる（逆圧電効果）材料のことである。圧電効果を用いた各種の応用としては、チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）の発見により、圧電磁器応用に拍車がかかり、セラミックフィルタや共振子、通信用メカニカルフィルタなどの応用は急激な進歩を遂げた¹⁾。現在、圧電素子は、アクチュエータやセンサなど広範囲にわたって実用化されている。

例えば、我々に身近なところでその例をあげると、携帯電話のマイク、スピーカ、インクジェットプリンタのインクジェット方式、デジタルカメラのズームレンズ駆動部などがある。圧電素子により、従来の電気機械変換機器には不可能であった小型化、省電力化が可能となり、機器の小型化に貢献している。また、近年、圧電素子の電気機械変換の効率が高いことや微小変位の制御が可能であることから、半導体製造装置、STM(走査型トンネル顕微鏡)、ハードディスクなどの情報関連機器などの高精度の位置決めが要求される分野でも高精度駆動装置として使用されている。

本論文は、PZT セラミックに代わり、線形性に優れると予想されるニオブ酸リチウム（LiNbO₃）を用いたアクチュエータに関するものである。

本章では、まず圧電材料についての基本的な事項の説明と、圧電材料を用いた応用例をいくつか紹介し、次に、圧電材料の種類と特性について述べ²⁾、最後に本論文の研究目的、最後に論文の構成について説明する。

1.2 圧電体の基本事項

1.2.1 圧電効果とその原理

誘電体とは、絶縁体的電子構造を持ち、電界を加えると誘電分極を発生する物質のことである。H₂O などのように分子自体がはじめから正負電荷の分布が対称でないため生じる双極子を永久双極子というが、この永久双極子をもつ分子からなる誘電体に外部電界を印加すれば、永久双極子は電界の方向に配向し、平均として電界方向に誘電分極が現れる。電界を取り去れば、熱じょう乱のために永久双極子の向きは再びばらばらとなり、分極は消失する³⁾。

このように誘電分極を生ずる誘電体だが、1880年にキュリー兄弟によって、応力あるいは歪みによって結晶に誘電分極を生ずる現象(圧電正効果)、また逆に電界をかけて誘電分極を生ずると歪みあるいは応力が生ずる現象(圧電逆効果)が発見された。

また、分極の二乗に比例した歪みを生じる性質を持っているものもあり、これを電歪効果と呼ぶ。例として図 1.1 に印加電界と歪みの関係を示す。圧電効果をもつ物質かどうかはその物質の対称性で決まり、対称の中心をもつ等方体は、圧電性は示さないが、電歪効果はもちうる。

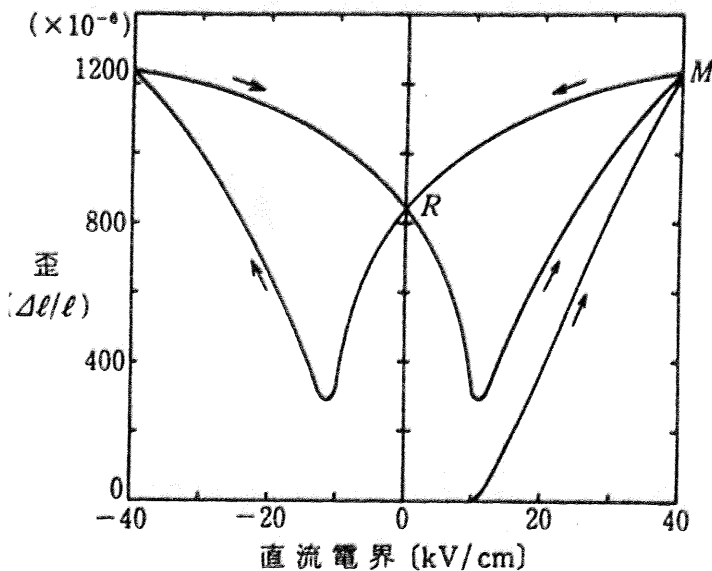


図 1.1 印加電界と歪みの関係 (PZT)³⁾

ある誘電体は外部電界を取り除いたあとも、永久双極子間の静電的相互作用が大きく、その状態の自由エネルギーが極小となるために、永久双極子がばらばらにならず、平行な状態を保つということがある。電界を取り除いた後も誘電分極が生じており、この分極を自発分極 P_s という。自発分極をもつ誘電体のなかには、自発分極とは逆の向きにかけられる外部電界がある大きさを超えると自発分極が反転するものがある。このような誘電体を強誘電体といい、反転する電界を抗電界 E_c という。強誘電体の分極と印加電界 E の関係は図 1.2 に示すようにヒステリシス曲線を描く。図中 P_r のこと残留分極という。

強誘電体であるものは必ず圧電性を示す(図 1.3)。また、図中の焦電体とは、結晶構造的に自発分極を持った極性結晶のことを言い、これらは焦電性を示す。焦電性とは、温度を変化させると自発分極が変化し、物体表面に電荷が現れる性質のことをいう。PZT や BaTiO_3 のような圧電材料として現在使用されているものの多くは、強誘電体に分類されるものが多い。

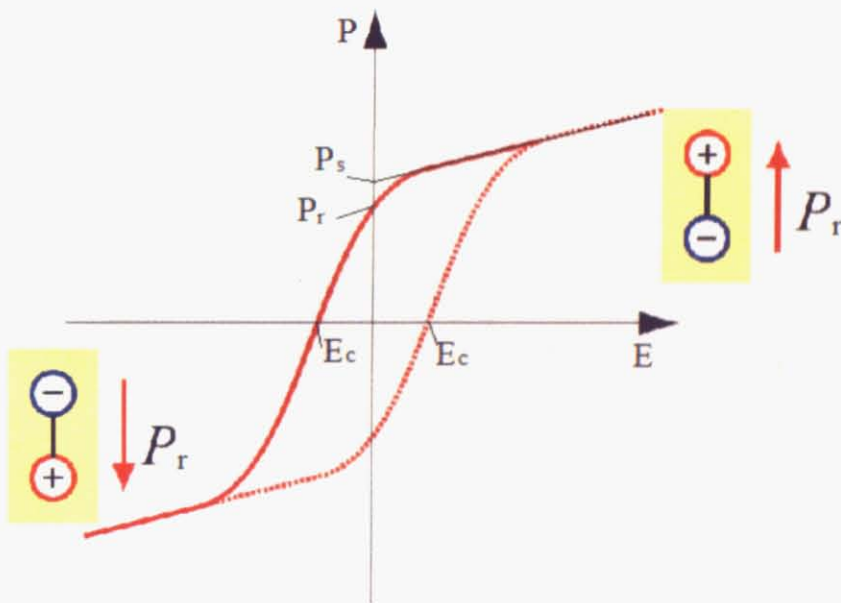


図 1.2 強誘電体の P-E 曲線

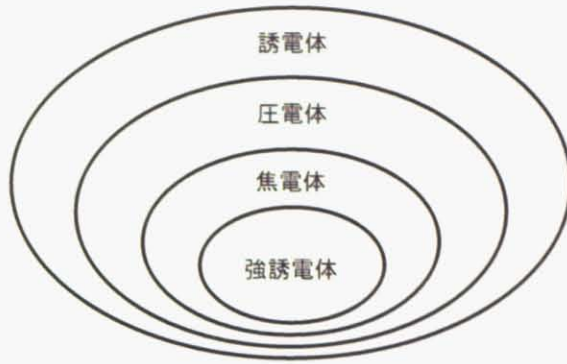


図 1.3 誘電体の分類

圧電効果を有するかはその物質の結晶が非対称性であるかどうかによることは上記したが、結晶には対称中心の他に、鏡映面、回転軸、回反軸の対称の要素がある。結晶は、それらの対称の組み合わせにより表 1.1 のように 32 の晶族に分類され、そのうちの 20 晶族は極性をもつ圧電結晶である。他の 12 晶族はただ一つの例外（点群 432）を除けば全て対称中心をもつ。

表 1.1 晶族の分類⁴⁾

極性	中心対称性	晶族数	結 晶 系										
			立方		六方		正方		三方 (菱面体)		斜方	単斜	三斜
非極性 結晶 (22)	有 (11)	11	$m\bar{3}m$	$m\bar{3}$	$6/mmm$	$6/m$	$4/mmm$	$4/m$	$\bar{3}m$	3	mmm	$2/m$	I
	無 (21)	11	432 $\bar{4}3m$	23	622 $\bar{6}m2$	$\bar{6}$	422 $\bar{4}2m$	$\bar{4}$	32		222		
極性 (焦電性) 結晶 (10)	無 (21)	10			$6mm$	6	$4mm$	4	$3m$	3	$2mm$	$2/m$	I

圧電性結晶

強誘電体中は高温になるにつれて、永久双極子の配列の規則性が乱され、自発分極が減少し、ある温度で消失する。この温度をキュリー点という。結晶の温度が上がるにつれて、極性を有していた結晶構造が相転移を経て、対称性のよい結晶構造に変化し、キュリー点に達して結晶の常誘電相に変化する。例としてチタン酸バリウムの温度による自発分極方向の変化と比誘電率の変化を図1.4と図1.5に示す。

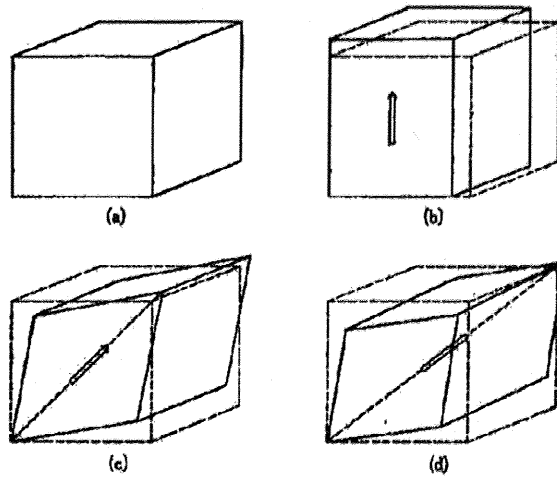


図 1.4 BaTiO₃ の自発分極方向の温度変化
 (a) 立方晶系(>120°C), (b) 正方晶系(5~120°C)
 (c) 斜方晶系(-90~5°C), (d) 斜方晶系(<-90°C)

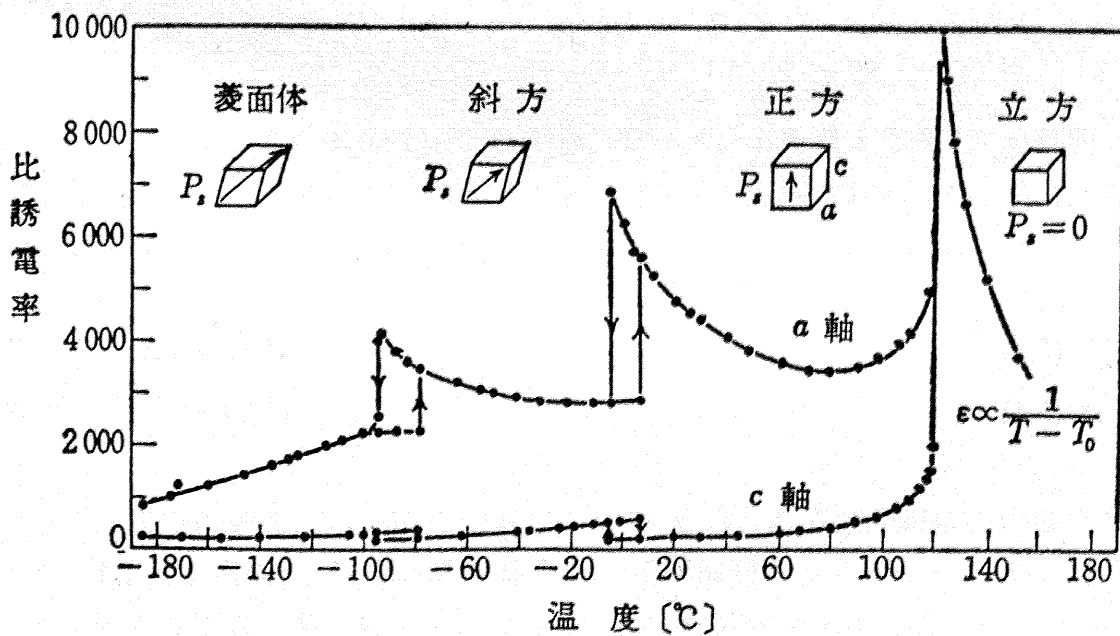


図 1.5 BaTiO₃ の比誘電率の温度変化⁵⁾

1.2.2 圧電基本式と圧電定数

圧電体では、応力 T および歪み S (機械的パラメータ) と電界 E および電気変位 D (電氣的パラメータ) とが圧電効果を介して互いに結び合っている。

たとえば、図 1.6 のように結晶に適当な座標軸を考える。電気系の物理的変数である電界 E 、電気変位 D はベクトル量であるから 3 つの成分を持つため、その x (1 軸), y (2 軸), z (3 軸) 方向の電界成分は E_1, E_2, E_3 , 電気変位成分を D_1, D_2, D_3 とし、次のような 3 成分の列ベクトルで表される。

$$[D] = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix}, \quad [E] = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

また、機械系の物理的変数である応力 T と歪み S は、 T_{ij}, S_{ij} のように式 1.2 に示すような 9 つの成分を持つテンソル量で表される。ここで、応力 T の最初の添字 i は応力方向を表し、2 番目の添字 j は応力が働く面の法線方向を表している。また、歪み S は、 S_{11} だと x (1 軸) 方向の歪みを表し、 S_{12} や S_{21} だとせん断歪みを表す。

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}, \quad [T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

ここで、回転する力が働かないことから、モーメントを考えて式 1.3 が証明され、また歪みによる相対変位を考えることで式 1.4 が証明されるため、式 1.2 の 9 つの成分のうち独立した要素は 6 つとなる。

$$T_{ij} = T_{ji} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.3)$$

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.4)$$

そこで、工学的表記では、応力の成分のうち x, y, z 方向の縦応力の成分を T_1, T_2, T_3 , せん断応力を T_4, T_5, T_6 とし、歪み成分のうち縦歪みを S_1, S_2, S_3 , せん断歪みを S_4, S_5, S_6 とし、式 1.5 のような列ベクトルで表される。

$$[S] = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 = S_{11} \\ S_2 = S_{22} \\ S_3 = S_{33} \\ S_4 = 2S_{23} = 2S_{32} \\ S_5 = 2S_{31} = 2S_{13} \\ S_6 = 2S_{12} = 2S_{21} \end{pmatrix}, \quad [T] = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 = T_{11} \\ T_2 = T_{22} \\ T_3 = T_{33} \\ T_4 = T_{23} = T_{32} \\ T_5 = T_{31} = T_{13} \\ T_6 = T_{12} = T_{21} \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

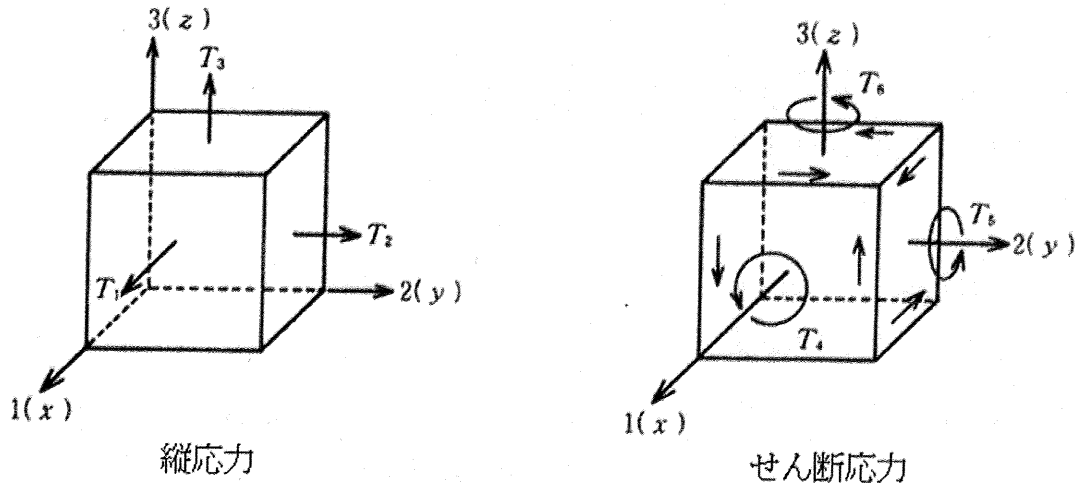


図 1.6 応力の各成分

圧電体に生じる歪み S は、圧電体にかかる応力 T による歪み $S = s^E T$ と圧電逆効果による歪み $S = d_i E$ によって決まる変数である。また、電気変位 D は電界の印加によって生じる電気変位 $D = e^T E$ と圧電正効果による電気変位 $D = d T$ によって決まる変数である。したがって、圧電体に応力 T と電界 E が加わった場合に発生する歪み S と電気変位 D は、

$$\left. \begin{aligned} S &= s^E T + d_i E \\ D &= d T + \varepsilon^T E \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

で表される。ここで、 s^E は弾性コンプライアンスで上付きの E は電界一定の条件の下での値であることを示す。また、 d は圧電正効果に対する圧電歪定数で d_i は圧電逆効果に対する圧電歪定数 d の転置行列を示し、 ε^T は誘電定数で上付きの T は応力一定の条件の下での値であることを示す。式 1.6 をすべての成分について書くと式 1.7 のようになる。

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{1.7}$$

ここで、式 1.7 の d_{ij} の添え字の i は電極面の法線方向を表し、 j は応力(又は歪み)の方向を表している。例えば、 d_{33} だと電極面の法線方向が 3 軸 (Z 軸) 方向で、それに対する歪み方向が 3 軸 (Z 軸) 方向であることを表している。

以上の式 1.6, 式 1.7 を d 形式の圧電基本式といい、独立変数を変えることで e 形式, h 形式, g 形式と呼ばれる式で表される。表 1.2 に他の形式とその定数の相互関係についてまとめる。ここで、表 1.2 の各形式の定数について、 d, e, h, g はそれぞれ 18 個の成分, c (スティフネス), s (コンプライアンス) はそれぞれ 36 個の成分, ε, β はそれぞれ 9 個の成分からなる。

表 1.2 圧電基本式と定数の相互関係

圧電基本式		定数の相互関係	
d 形式	$S = s^E T + d_i E$ $D = d T + \varepsilon^T E$	$s^E - s^D = g_i d = d g$ $c^D - c^E = h_i e = e_i h$	
e 形式	$T = c^E S - e_i E$ $D = e S + \varepsilon^S E$	$\varepsilon^T - \varepsilon^S = e d_i = d e_i$ $\beta^S - \beta^T = g h_i = h g_i$	
g 形式	$S = s^D T + g_i D$ $E = -g T + \beta^T D$	$s^D = (c^D)^{-1}$ $\varepsilon^T = (\beta^T)^{-1}$	$s^E = (c^E)^{-1}$ $\varepsilon^S = (\beta^S)^{-1}$
h 形式	$T = c^D S - h_i D$ $E = -h S + \beta^S D$	$d = \varepsilon^T g = e s^E$ $g = h s^D = \beta^T d$	$e = d c^E = \varepsilon^S h$ $h = \beta^S e = g c^D$

式 1.7 の圧電歪定数 d や誘電率 ϵ , コンプライアンス s は三斜晶系の場合で最も一般的なものであるが, 普通の結晶はその対称性によって, 定数に対称要素のあるものは 0 になり, 場合によっては同じ値になるのでこれらはより簡単になる. 例えば, z 軸 (3 軸) 方向に残留分極を有する圧電セラミクスは, z 軸に関して軸対称である(対称点群 ∞mm). 座標軸を z 軸のまわりに任意の角度だけ回転しても定数は変化しないので, d, ϵ^T, s^E はのテンソル表示は以下のようなになる.

$$d_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\epsilon_y^T = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix}$$

$$s_y^E = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix}$$

1.2.3 電気機械結合係数と機械的品質係数

圧電材料の評価として目安となるものに電気機械結合係数 K と機械的品質係数 Q_m がある。電気機械結合係数とは、電気エネルギーと機械エネルギーの変換の割合を表す量のこと、 K で表される。一般的な定義は以下の式で表される。

$$K^2 = \frac{\text{(機械的な形で蓄えられたエネルギー)}}{\text{(加えられた電氣的エネルギー)}} = \frac{\text{(電氣的な形で蓄えられたエネルギー)}}{\text{(加えられた機械的エネルギー)}}$$

機械的品質係数とは、 Q_m (もしくは単に Q)と表され、共振系が蓄積している振動エネルギーと単位時間当りに外界と出入りするエネルギーとの比のことである。つまり、共振時において、 Q_m が大きいほどエネルギーが低損失であり、アクチュエータとしての効率がよいことになる。圧電素子の共振特性を評価する上で、 Q_m が大きい材料では、振動が成長するにも減衰にも時間がかかる。逆に、 Q_m が小さい材料では、振動が成長するのも減速するのも速いという特徴がある。

1.3 圧電素子を用いた応用例

1.3.1 超音波モータ

超音波モータは、モータ動作に必要な回転運動あるいは直線運動を超音波振動から得るモータの総称である。超音波振動する部分をステータといい、回転あるいは直線運動する可動部分をロータあるいはスライダという。

圧電素子を用いて、弾性体に超音波振動を励振し、その振動エネルギーを摩擦力を介してロータあるいはスライダを駆動するという原理である。

低速で高効率期待でき、高トルクが得られる。また電磁ノイズがなく、制御性がよい等の特徴がある。カメラのオートフォーカスなどの動と静の状態変化を目的とする応用に適する。

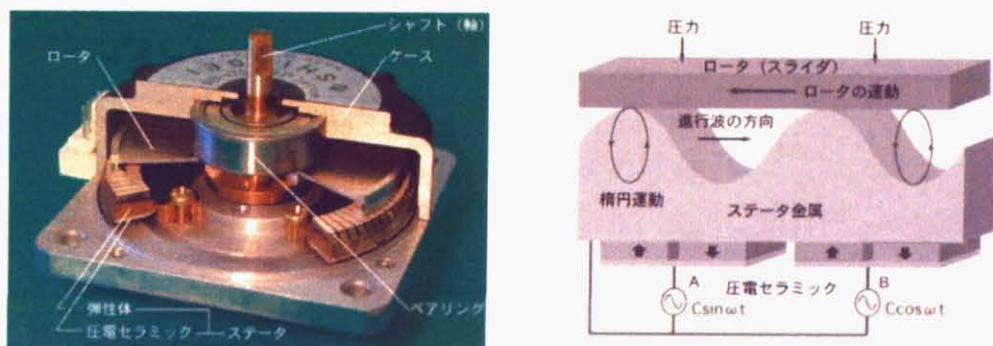


図 1.7 超音波モータ(左図)とモータの原理(右図)⁶⁾

1.3.2 インクジェットプリンタ

プリンタの印字方式にもさまざまあるが、インクジェット方式のプリンタはインク液滴を細いノズルから噴出させて直接紙に印字する方式である。インク液滴を噴出させる手段として利用されているのが圧電素子である。構造を図1.8に示す。インクの流露の一部を押し縮めることでノズルからインクを噴出させる。印加電圧を0にもどせば初期状態に戻り、再び次のインク滴を噴出できる。

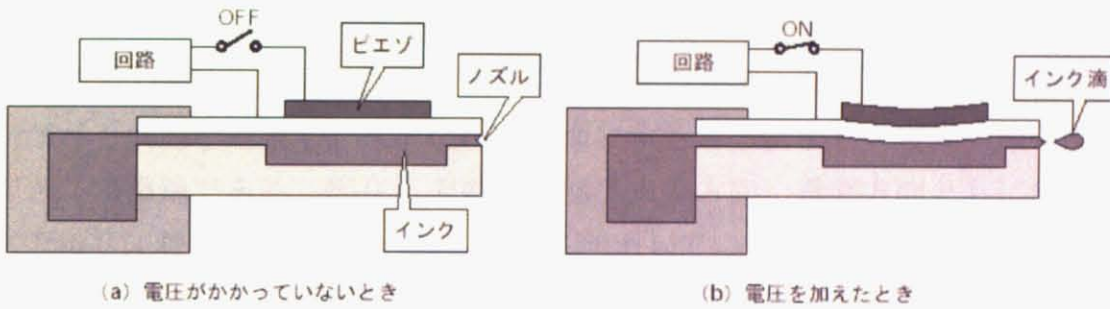


図 1.8 インクジェットプリンタの原理⁷⁾

1.3.3 走査型トンネル顕微鏡(STM)

圧電素子による位置決めアクチュエータの用途として、走査型プローブ顕微鏡のステージ部への使用が挙げられる。走査型顕微鏡とは、先端を尖らせた探針を用いて、物質の表面をなぞるように動かして表面状態を拡大観察する顕微鏡の種類であり、AFM や STM が代表例に挙げられる。AFM については、第 5 章で詳しく述べるため、ここでは STM について述べる。

走査型トンネル顕微鏡 (STM : scanning tunneling microscope) は、金属探針を導電性観察試料に約 1nm まで近づけて、両者の間にわずかな電圧を印加すると流れる量子力学的トンネル電流を測定し、これが一定になるように探針を上下させながら表面を走査し、その軌跡を画像にすることにより、表面の原子を観察できる顕微鏡である。現在、その分解能は水平方向、垂直方向ともに原子オーダーであり、特に垂直方向は 10pm までに向上している。

探針と試料間を一定に保つように微動機構が必要となるが、通常この微動素子には圧電セラミックスである PZT (チタン酸ジルコン酸鉛)が使用されている。STM ユニットの図 1.9 に、使用される微動素子の例を図 1.10 に示す。(a)は、x, y, z に相当する角柱状の圧電体が組み合わさったもので、比較的作りやすく動作も安定している。(b)は、一体構造のキュービック型微動素子で、PZT のブロックをくり抜き x, y, z 軸を形成したものである。(c)は十字型微動素子で、対称性が比較的高いのが特徴である。(d)はチューブ型微動素子で、小形かつ高剛性のため高速走査に適している。また、対称性もよく、熱ドリフトの軽減に適しており、現在主流になりつつある微動素子である。

圧電体のヒステリシスやクリープの影響を軽減する必要があり、その方法として試料や探針などを対称位置に配置することや短時間で観察すること、圧電体を電荷制御駆動させることなどが有効である。

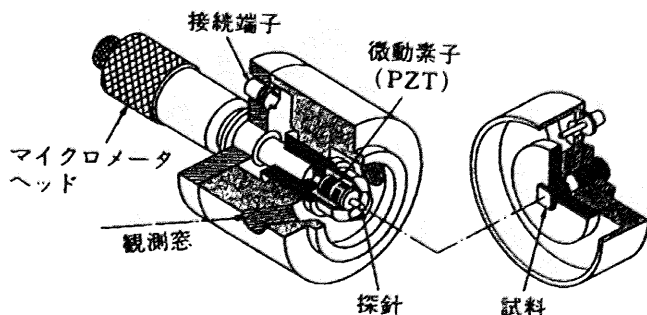


図 1.9 STM ユニットの立体図⁸⁾

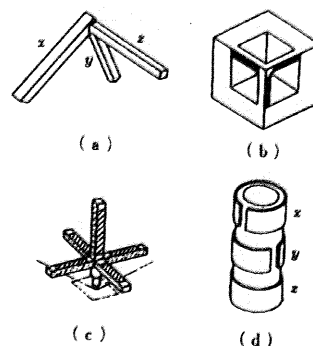


図 1.10 微動素子の例⁸⁾

1.4 圧電単結晶と圧電セラミックの違い

1.4.1 圧電セラミック PZT の特徴

圧電セラミックとは、粉を高温で焼き固めた多結晶の圧電体のことをいう。しかし、そのままの状態では、微細な結晶粒がランダムに配向した多結晶からなっており、さらに各微結晶は複数の分域 (domain) からなるため、自発分極は有していない。つまり、圧電性はないので、キュリー点付近で一定方向の電界を印加し結晶中の分極方向をそろえることで、電界を取り去った後も分極が残留し圧電性を示すようになる。この処理のことを分極処理 (poling) という。図 1.11 に分極処理の様子を示す。

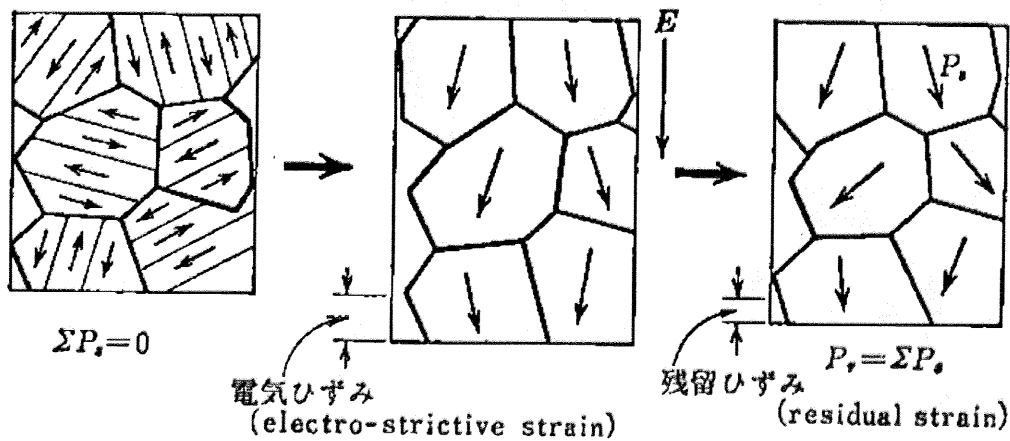


図 1.11 圧電セラミックの分極処理

圧電セラミックの研究は、1947 年にアメリカのロバーツがチタン酸バリウム (BaTiO_3) に高電圧を加えて分極処理を施すと圧電性が付与されたことを発見したことに始まる¹⁾。その後圧電セラミックスの研究が盛んに行なわれ、Ba や Ti を他の金属イオンで置換することで特性改善が図られた。そして、1954 年にジルコン酸鉛 (PbZrO_3) とチタン酸鉛 (PbTiO_3) の固溶体である PZT の発見により、圧電応用は急激な進歩を遂げ、それまで実用が困難であった各種の応用が実現可能となった。圧電性が大きく、安価で多様な形状に加工しやすいことから、広く使用されている。

BaTiO_3 や PbTiO_3 の結晶構造は常温では正方晶であるが、 Ti^{4+} イオンが結晶中心から少しずれているため、 Ti^{4+} の変位により双極子が生じ、自発分極が生じている。 BaTiO_3 や PbTiO_3 のもつ結晶構造をペロブスカイト構造という。ペロブスカイト構造を図 1.12 に示す。

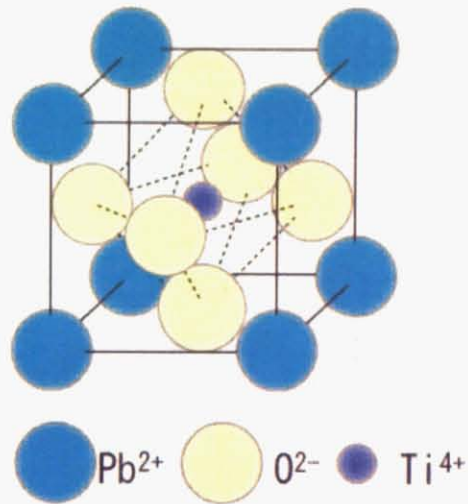


図 1.12 ペロブスカイト構造 (PbTiO_3)

1.4.2 圧電単結晶 LiNbO_3 の特徴とこれまでの応用例

圧電単結晶として有名なものには、温度特性が非常に優れている水晶や電気機械結合係数 K の大きなニオブ酸リチウム (LiNbO_3) やタンタル酸リチウム (LiTaO_3) などがある。水晶は、歴史的にはランジュバンが第一次世界大戦中、ドイツの潜水艦の探知するために水中超音波探知機に応用したことで有名である。 LiNbO_3 、 LiTaO_3 などの圧電単結晶の分極構造は、図 1.13 に示すイルメナイト構造をとっている。Li の位置によって自発分極の方向が変わり、原子半径の小さい Li が酸素のトライアングルを通過することにより分極反転は起こる。また、結晶を構成しているドメインは 180°cc ドメインのみで 90° ドメインはない(図 1.14)。

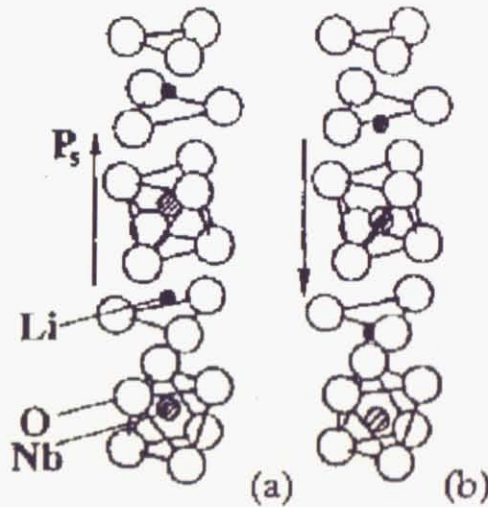


図 1.13 イルメナイト構造

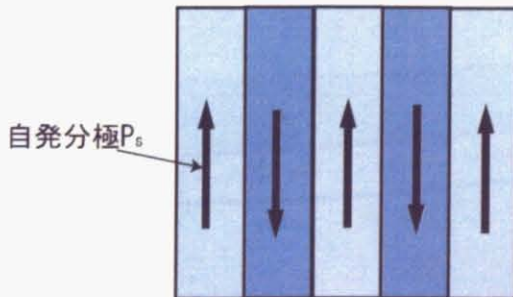


図 1.14 180°cc ドメイン

LiNbO₃の応用例として代表的なものに、SAWフィルタがある。弾性表面波 (SAW : surface acoustic wave) とは、媒質の表面付近にエネルギーを集中させて伝播する波で、SAWフィルタとは圧電性結晶の表面を伝搬する弾性波を介して、ある特定の周波数の信号のみを通すことを利用したフィルタのことである。このフィルタは、テレビ、ラジオ、携帯電話などの部品として幅広く使用されている⁷⁾。

また、中村らは、板厚 500 μ m 程度の LiNbO₃ を大気中でキュリー点よりもわずかに低い 1110 $^{\circ}$ C で 5 時間程度の熱処理をすることにより、板厚の中央を境として分極の反転層が形成できることを見出した⁹⁾。この技術により接着層なしで高い Q 値を有する屈曲振動子が作製でき、共振周波数のばらつきも小さくできる。

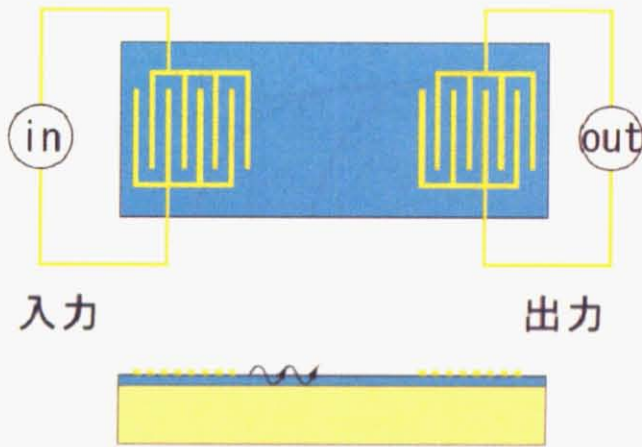


図 1.15 SAW フィルタ

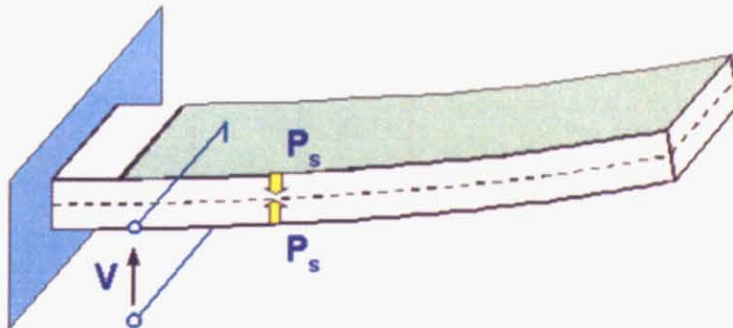


図 1.16 ニオブ酸リチウムモノモルフ⁹⁾

1.4.3 アクチュエータとしての圧電単結晶 LiNbO_3

1.2節で述べたように強誘電体に印加する電界が抗電界を超えると分極は反転するため、圧電セラミックスのP-E曲線は図1.17のようにヒステリシス曲線を描く。同じく、圧電単結晶 LiNbO_3 のP-E曲線を図1.18に示す。抗電界で分極反転するためヒステリシスはあるが、抗電界を超える前の分極は線形である。これは、圧電セラミックスが分極処理しても各結晶粒が同じ方向に分極しないのに対し、 LiNbO_3 は図1.14のように 180° ドメインであるため電界に対する分極方向が結晶中全て同じだからである。分極を動きやすくさせることにより圧電定数は大きくなるが、同時に分極が回転するなどの多くの自由度を持つと、ヒステリシスは大きくなる。

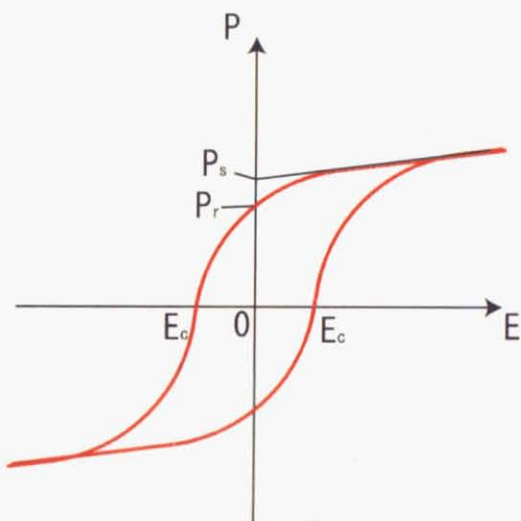


図 1.17 圧電セラミックスの P-E 曲線

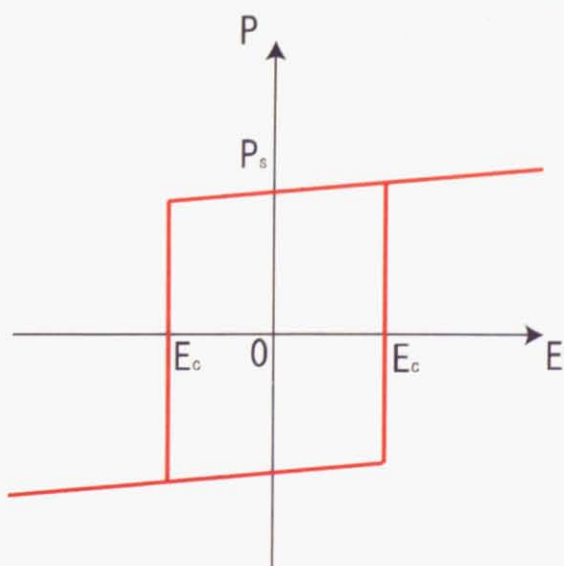


図 1.18 圧電単結晶 LiNbO_3 の P-E 曲線

このような P-E 曲線の違いが変位 - 電圧特性にも違いを与える。圧電セラミックと LiNbO_3 の変位 - 電圧特性をそれぞれ図 1.19(左図), 図 1.19(右図)に示す。圧電セラミックでは, 図 1.17 に示したように P-E 曲線が電界 0 の付近で非線形性およびヒステリシスを生じるため, 変位 - 電圧特性も非線形およびヒステリシスを描く。しかし, LiNbO_3 では電界 0 の付近での P-E 曲線が線形であるため, 図 1.19(右図)のように変位 - 電圧特性も線形性を保つと期待できる。圧電セラミックの変位 - 電圧特性の例を図 1.20 に積層セラミックアクチュエータの変位 - 電圧特性を示す。現在, 精密位置決め装置の微動装置にも PZT などの圧電セラミックが使用されるのが一般的であり, このヒステリシスと非線形性が問題となっている。

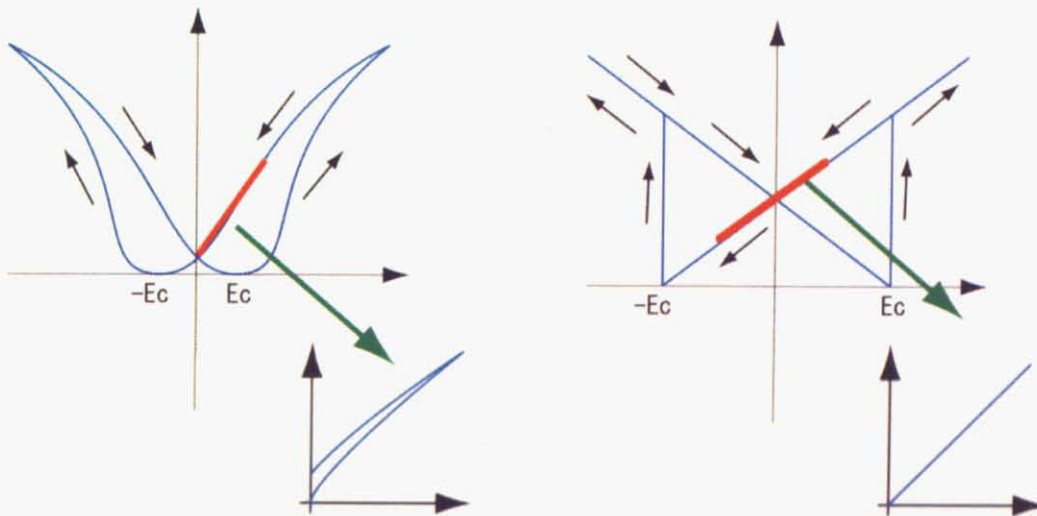


図 1.19 圧電セラミクス(左図)と圧電単結晶 LiNbO_3 (右図)の変位 - 電圧特性

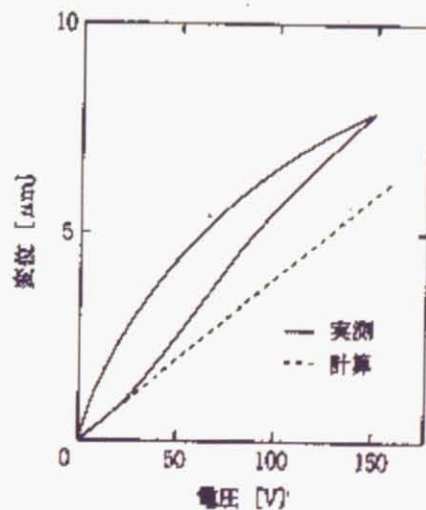


図 1.20 積層セラミックアクチュエータの変位 - 電圧特性¹⁰⁾

ここで、図 1.16 に示した 140°回転 Y 板 LiNbO₃ モノモルフの変位 - 電圧特性を図 1.21 に示す¹¹⁾。単結晶圧電体を用いているため、ほぼ理論式どおりの変位が発生し、ヒステリシスもない。またクリープも起こらずオープンループでの制御が可能である。また、Gopalan らによる LiNbO₃ の P-E ヒステリシス曲線を図 1.22 に示す¹²⁾。この図から 20 (kV/mm) から -16 (kV/mm) までは分極は一定であることが確認できる。

また、キュリー温度が 1210°C と非常に高いことから、高温下でも使用できるアクチュエータとしても期待できる^{13,14)}。現在、高温で使用できるとされているアルニコ磁石でもキュリー温度は 850°C で、使用温度は 450°C である。圧電材料としては、PZT のキュリー点は 350°C で、使用温度は 150°C 程度しかない。

本研究では圧電縦効果を利用した z 方向への精密位置決めを可能にする LiNbO₃ 積層アクチュエータを作製する。図 1.21 に示したモノモルフ型のアクチュエータの場合、梁形状のため、位置決め回転の成分が入ってしまうこと、共振周波数が非常に低くなってしまうことなどがあり、位置決めステージとしては適していない。LiNbO₃ の厚み方向の圧電定数 d_{33} は約 6 (pC/N) と極めて小さいため実用化には適していないとされているが、次の章で変位拡大方法について述べる。変位 - 電圧特性に図 1.21 のような優れた線形性が予想され、サブオングストロームの定量性を有する精密位置決め装置への応用が期待できる。また、図 1.22 から 20 (kV/mm) もの電界を印加できることが確認できているため、位置決めへの応用に最低限必要な変位量も発生できる。

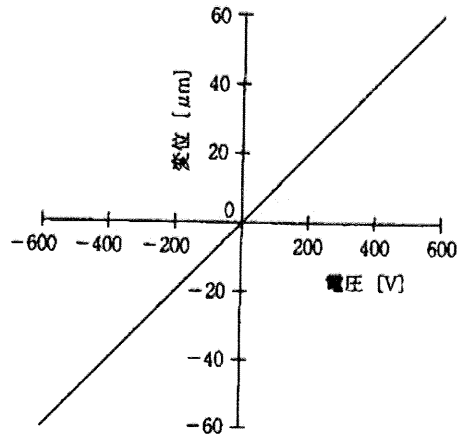


図 1.21 140°回転 Y 板 LiNbO₃ モノモルフの変位 - 電圧特性¹¹⁾

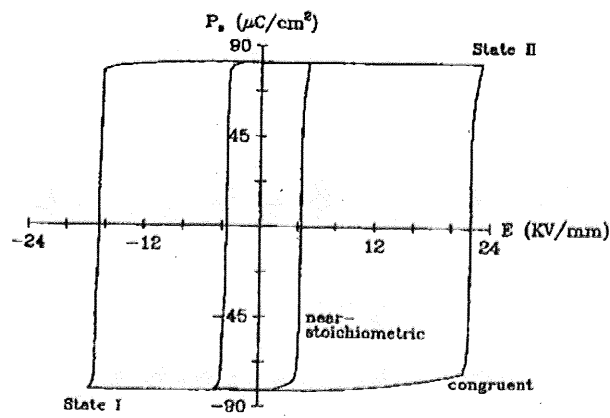


図 1.22 LiNbO₃ の P-E 曲線¹²⁾

1.5 本論文の研究目的

現在、最も広く使われている圧電体は、チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) である。圧電セラミックの一つである PZT は圧電定数が非常に大きく、超音波モータや原子間力顕微鏡(AFM)の位置決めステージなどに応用されている。しかし、PZT は変位-電圧特性にヒステリシスがあり非線形性を有すること、ドリフトによる位置決め誤差の影響があること、使用温度が 200°C以下に制限されること、環境的に悪影響を及ぼす鉛を含有することなどの問題がある。

そこで本研究では、単結晶であるため線形性に優れると予想されるニオブ酸リチウム (LiNbO_3) に着目した。 LiNbO_3 は、圧電定数 d が PZT ほど大きくないため分極方向の圧電アクチュエータとしての研究は少ないが、結晶のカット角を変えたり積層化¹⁵⁾したりすることで、PZT に匹敵する圧電変位を得ることが可能となる。また、キュリー点も 1210°Cと高いので高温アクチュエータとしての応用も期待できる。

本研究では、 LiNbO_3 積層アクチュエータを試作し、圧電・振動特性を評価するとともに、 LiNbO_3 の変位-電圧特性の優れた線形性を実証することを目的とした。また、実際に AFM への実装を行い、サブオングストロームの定量性を有する AFM の実現可能性を検証した。

1.6 本論文の構成

第 1 章では、圧電材料の基本原理やその応用例などを挙げ、本研究で主に取り扱う単結晶圧電体 LiNbO_3 の特徴と、これまでの応用例についても説明した。章末には本研究の目的と構成について記述した。

第 2 章では、 LiNbO_3 を用いた積層アクチュエータの作製について述べる。 LiNbO_3 は位置決め用材料としては圧電定数が小さすぎるという欠点がある。この欠点を解消するための二つの方法として、結晶カット角の最適化と LiNbO_3 単結晶の積層化について説明する。

第 3 章では、試作した積層アクチュエータの電気的な特性を検証するために、圧電振動子の等価回路について説明し、実際に試作アクチュエータの測定結果をもとに等価回路によるモデル化を行なう。

第 4 章では、サブナノメートルの分解能を有するレーザ変位計を用いて試作した積層アクチュエータの変位－電圧特性の線形性を評価する。また、アクチュエータの変位分布、圧電変位の周波数依存性やアクチュエータの最大変位についても評価する。

第 5 章では、積層アクチュエータの応用の具体例として、原子間力顕微鏡への実装を提案し、そのための原理の説明および設計、動作テストのための LiNbO_3 の圧電定数測定を行う。

第 6 章では、まとめ及び今後の展望について論じる。

第2章

積層アクチュエータの設計と作製

2.1 はじめに

1章では、圧電効果の基礎について述べた。本論文で扱うアクチュエータは、圧電縦効果を利用したZステージ制御、圧電横効果を利用したXYステージ制御の2種類であり、組み合わせることで3次元の位置決めシステムとすることを目的とする。縦効果とは外部電界方向と歪み方向（または応力方向）が平行であることを意味し、横効果とは外部電界方向と歪み方向が垂直であることを意味する。また、図2.1で、歪みの種類と方向を示す。白矢印は外部電界方向を、黒矢印は歪みの方向を示す。本論文においては、Z方向のアクチュエータには、厚み方向（図2.1におけるZ方向）の伸縮歪みを用い、XY方向のアクチュエータには、厚みと垂直な方向(図2.1におけるXY方向)の、せん断歪みを用いることとした。

LiNbO₃は結晶のカット角により諸定数が変化するが、最も一般的なZカットで考えると、LiNbO₃をZ方向の位置決めを用いる場合、Z軸方向に電圧を印加しても厚み方向圧電定数 d_{33} (=6pC/N)が小さいためZ軸方向への変位は小さい。また、XY方向への位置決めを用いる場合、せん断方向圧電定数 d_{15} (=68pC/N)は比較的大きいが、厚み方向の変位も発生してしまい、制御性の面で難がある。

本章では、圧電定数が小さいため変位量が小さいというLiNbO₃の欠点を補い、意図した方向のみに変位を発生させるため、①圧電結晶の最適カット角を考慮することと②圧電結晶を積層させることの二つの方法について説明する。最後に、その方法により試作したアクチュエータの特性を見積もる。

ただし、Z方向アクチュエータに関しては、当研究グループの川俣昭人氏が既にその検証を終えているため¹⁶⁾、その結果のみを記し、本論文ではXY方向アクチュエータについて主に述べることとする。

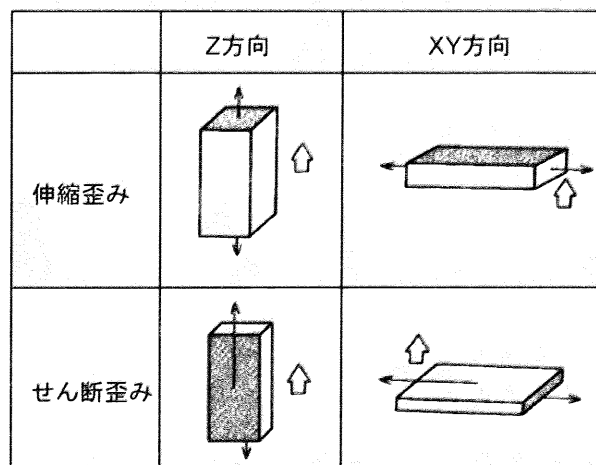


図 2.1 歪みの種類と方向

2.2 結晶カット角の最適化

2.2.1 圧電材料の異方性

1.2 節で説明した圧電体の材料定数 c_{ij} (弾性定数), e_{ij} (圧電定数), ε_{ij} (誘電率) は, 各結晶の結晶軸に合わせた座標系(X, Y, Z)に対して与えられる. ところが, 圧電材料には必ず異方性があるため, その切断角(カット), 振動方向, あるいは電界を印加する方向によって, その特性は異なってくる¹⁷⁾. そこで, 任意のカットに対する特性を理論的に扱うには, 図 2.2 に示すオイラー角によって座標変換を行なうことが必要となってくる. オイラー角には右手系と左手系があるが, 工学の分野では図に示す右手系が使われる.

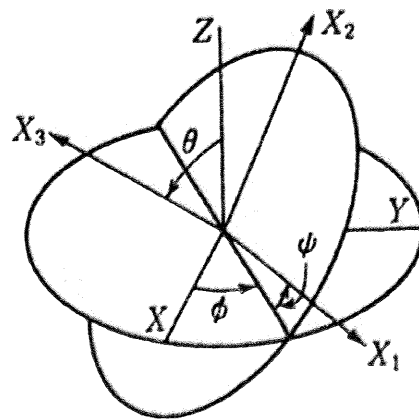


図 2.2 右手系のオイラー角⁹⁾

結晶軸(X, Y, Z) に対して与えられた材料定数を, オイラー角(ϕ , θ , ψ) による新しい座標系(X_1, X_2, X_3) における定数に変換するには, 次式の公式による. ここでオイラー変換した際の材料定数のテンソルはクォーテーションをつけて c_{ij}' , e_{ij}' , ε_{ij}' のように表す.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} c_{ij}' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} c_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.1) \\ \begin{bmatrix} e_{ij}' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \gamma \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \varepsilon_{ij}' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \gamma \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ここで, 座標変換に必要なマトリックスは次式で表される.

$$\alpha = \begin{bmatrix} l_1^2 & l_2^2 & l_3^2 & 2l_2l_3 & 2l_2l_3 & 2l_2l_3 \\ m_1^2 & m_2^2 & m_3^2 & 2m_2m_3 & 2m_3m_1 & 2m_1m_2 \\ n_1^2 & n_2^2 & n_3^2 & 2n_2n_3 & 2n_3n_1 & 2n_1n_2 \\ m_1n_1 & m_2n_2 & m_3n_3 & & & \\ n_1l_1 & n_2l_2 & n_3l_3 & & & \\ l_1m_1 & l_2m_2 & l_3m_3 & & & \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} l_1^2 & l_2^2 & l_3^2 & l_2l_3 & l_2l_3 & l_2l_3 \\ m_1^2 & m_2^2 & m_3^2 & m_2m_3 & m_3m_1 & m_1m_2 \\ n_1^2 & n_2^2 & n_3^2 & n_2n_3 & n_3n_1 & n_1n_2 \\ m_1n_1 & m_2n_2 & m_3n_3 & & & \\ n_1l_1 & n_2l_2 & n_3l_3 & & & \\ l_1m_1 & l_2m_2 & l_3m_3 & & & \end{bmatrix}$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} l_1 &= \cos \varphi \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \sin \varphi \\ l_2 &= -\sin \varphi \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \cos \varphi \\ l_3 &= \sin \theta \sin \phi \\ m_1 &= \cos \varphi \sin \phi + \cos \theta \cos \phi \sin \varphi \\ m_2 &= -\sin \varphi \sin \phi + \cos \theta \cos \phi \cos \varphi \\ m_3 &= -\sin \varphi \cos \phi \\ n_1 &= \sin \varphi \sin \theta \\ n_2 &= \cos \varphi \sin \theta \\ n_3 &= \cos \theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

2.2.2 圧電縦効果に最適なカット角の導き方

本項では、2.2.1 項で説明した座標変換を用いて、本研究で用いる LiNbO₃ に最適な結晶カット角を求めることとする。本研究で用いたい圧電結晶の特性として、XY ステージ制御を行なうのに最適である必要がある。すなわち、LiNbO₃ 結晶板のせん断方向に変位させるのに最適なカット角を求めることになる。通常は、縦波や横波など複数の波が同時に励振されることは好ましくないため、単一の波動のみが励振されるカットが使われる。したがって、厚み方向に電界をかけた時、せん断歪みを大きく、尚且つ、厚み方向には変位しないようなカット角を以下で求めることとする。

LiNbO₃ の材料定数 ($c_{ij}^E, e_{ij}, \varepsilon_{ij}^S$) と表 1.2 の定数の相互関係から圧電歪み定数

d のテンソルを導く．以下に LiNbO_3 の材料定数 ($c_{ij}^E, e_{ij}, \varepsilon_{ij}^S$) のテンソル表示を示す¹³⁾．

$$[c_{ij}^E] = \begin{bmatrix} 2.03 & 0.53 & 0.75 & 0.09 & 0 & 0 \\ 0.53 & 2.03 & 0.75 & -0.09 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.75 & 2.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0.09 & -0.09 & 0 & 0.60 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.60 & 0.09 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.09 & 0.75 \end{bmatrix} (\times 10^{11} \text{ N} / \text{m}^2)$$

$$[e_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 3.7 & -2.5 \\ -2.5 & 2.5 & 0 & 3.7 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 1.3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\text{C} / \text{m}^2) \quad (2.3)$$

$$\frac{[\varepsilon_{ij}^S]}{\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} 44 & 0 & 0 \\ 0 & 44 & 0 \\ 0 & 0 & 29 \end{bmatrix}$$

まず，2.2.1 項の式 2.1 から，オイラー変換した際の圧電歪み定数を求める式を導出する．表 2.2 の定数の相互関係から以下のようなになる．

$$d = e \times s^E = e \times (c^E)^{-1} \quad (2.4)$$

式 2.4 と 2.3 に示した材料定数のテンソルより圧電歪定数 d のテンソル表示は次のようになる．

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 67.9 & -41.5 \\ -20.7 & 20.7 & 0 & 67.9 & 0 & 0 \\ -0.94 & -0.94 & 5.9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{pC/N}) \quad (2.5)$$

すなわち, XY アクチュエータに必要な, せん断歪みを示す圧電定数 $d_{15}=d_{24}=67.9$ (pC/N)であることが分かる.

結晶から板を切り出すときの表記法は IRE(Institute of Radio Engineers :IEEE の前身のひとつ)によって標準が決められている. ここでは, 図 2.3 のように厚み方向に Y 軸を持つような結晶板を考える. このとき, オイラー角は $(0, \theta, 0)$ を表す. このような結晶カットを Y-cut または θ 回転 Y 板という. Y-cut の結晶板を用いるとき, 厚み方向の圧電縦効果を表す圧電定数は d_{22} (つまり, Y 軸方向に電界を印加したときに Y 軸方向に歪んだ変位を表すための定数) であり, これはセラミックスの圧電定数 d_{33} に相当する. 一方, せん断歪みを表す圧電定数は d_{24} となり, セラミックスの d_{15} に相当する. 厚み方向の圧電定数 d_{22} とせん断歪みの圧電定数 d_{24} をカット角 θ の関数にして導く.

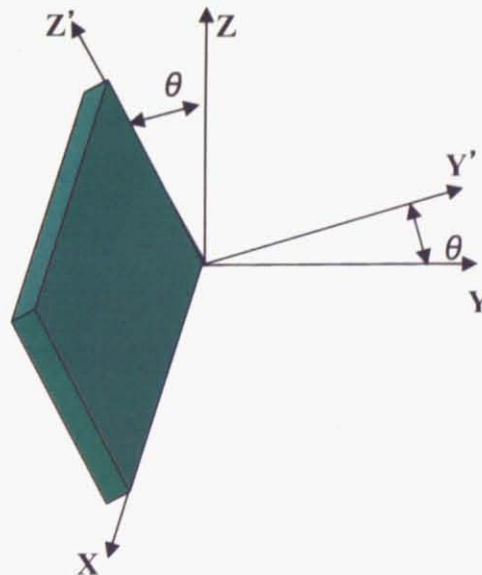


図 2.3 θ 回転 Y 板

ここで、 c の逆行列は式 2.1 より

$$\left[c_{ij}^{E'} \right]^{-1} = \left([\alpha]^{-1} [c_{ij}] [\beta] \right)^{-1} = [\beta]^{-1} [c_{ij}^E] [\alpha]$$

であることから、式 2.1 より、

$$\begin{aligned} \left[d_{ij}' \right] &= \left[e_{ij}' \right] \left[c_{ij}^{E'} \right]^{-1} \\ &= [\gamma]^{-1} [e_{ij}] [\beta] [\beta]^{-1} [c_{ij}^E]^{-1} [\alpha] \\ &= [\gamma]^{-1} [e_{ij}] [c_{ij}^E]^{-1} [\alpha] \\ &= [\gamma]^{-1} [d_{ij}] [\alpha] \end{aligned} \tag{2.6}$$

式 2.2 を式 2.6 に代入し、オイラー角 $\phi = \phi = 0$ を代入すると式 2.7 を得る.

$$\begin{cases} d_{22} = 20.7 \cos^3 \theta + 68.25 \cos^2 \theta + 6 \sin^3 \theta \quad (pC/N) \\ d_{24} = 69.1 \cos^3 \theta - 41.4 \cos^2 \theta \sin \theta - 55.4 \cos \theta \sin^2 \theta \quad (pC/N) \end{cases} \tag{2.7}$$

式 2.7 より、圧電定数 d_{22} 、 d_{24} とカット角 θ の関係は図 2.4 のようになった。カット角による圧電定数の変化などは、Wang 氏による論文に詳報がある¹⁸⁾。この図から、圧電定数 d_{22} が 0 となるときの θ は $\theta=163^\circ$ のみである。この時のせん断の圧電定数 $d_{24}=66.0(pC/N)$ であり、 $\theta=0^\circ$ の時の $d_{24}=67.9(pC/N)$ と比べ、若干小さい値となるが、厚み振動を起こさないという点で 163° Y-cut の結晶版を用いることとした。また、Z 方向アクチュエータについては、計算上では $\theta=38.9^\circ$ のものが望ましいが、現在入手可能なカット角を表 2.1 (山寿セラミックスより)¹⁹⁾ より、 38.9° にもっとも角度の近い 36° Y-cut の結晶板 (36° 回転 Y 板) をアクチュエータ作製に用いることにした。

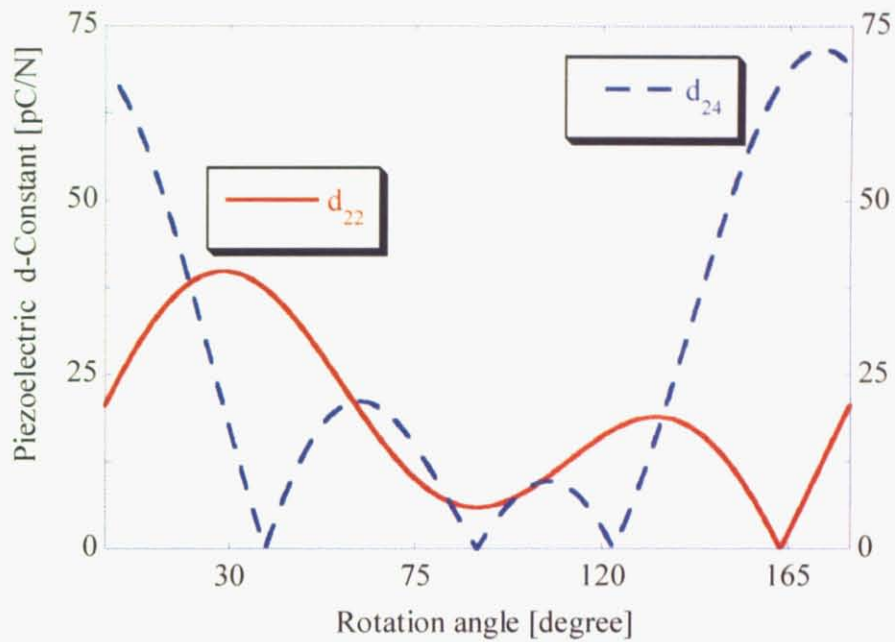


図 2.4 カット角と圧電定数の関係

表 2.1 市販されている LiNbO_3 のカット角の種類とその用途¹⁹⁾
(山寿セラミクスより)

Surface Acoustic Wave Properties

Orientation	Propagation
127.86°Y-cut	X-Axis
64°Y-cut	X-Axis
41°Y-cut	X-Axis
Y-cut	Z-Axis

Selective Piezoelectric Coupling Factors & Frequency Constants

Orientation	Wave Type
X	Shear
Z	Extensional
36°Y-cut	quasi-extensional
163°Y-cut	quasi-shear

163°回転 Y 板の圧電歪定数を d_{ij} (163°) のように表すこととすると d_{ij} (163°) は式 2.8 のようになる。また、163°Y-cut のヤング率 c および誘電率 ϵ についても c_{ij} (163°) のように表し、式 2.9, 2.10 に示す。

$$d_{ij}(163^\circ) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -52.8 & 59.5 \\ 19.6 & 0.09 & -18.3 & -66.0 & 0 & 0 \\ 6.7 & 0.3 & -11.1 & -16.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{pC/N}) \quad (2.8)$$

$$c_{ij}(163^\circ) = \begin{bmatrix} 2.0 & 0.64 & 0.50 & 0.049 & 0 & 0 \\ 0.64 & 2.3 & 0.62 & 0.17 & 0 & 0 \\ 0.50 & 0.62 & 2.1 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0.49 & 0.17 & 0.01 & 0.76 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.67 & -0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1 & 0.66 \end{bmatrix} \quad (\times 10^{11} \text{ N/m}^2) \quad (2.9)$$

$$\frac{[\epsilon_y^s(163^\circ)]}{\epsilon_0} = \begin{bmatrix} 44 & 0 & 0 \\ 0 & 43 & 4.6 \\ 0 & 4.6 & 29 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

式(2.8)において、Y 方向を厚み方向とみなした場合、2 行目の数値を考えればいいということになる。これより、厚み方向 d_{22} (縦振動=印加電界と平行な伸縮) は 0.09(pC/N)と極小となり、せん断方向 d_{24} は -66(pC/N)という値となる。せん断歪みは一方向のみで、他のせん断歪みは起こらないこともわかる。また、横振動(d_{21} , d_{23} =XY 方向への伸縮歪み：図 2.1 参照)が起きてしまうが、積層することでせん断方向の歪みが拡大されるのに対し、これは積層枚数に依存せず一定となるため、積層枚数を増やしていくと相対的に無視できる程度となる。

2.3 積層型 LiNbO₃ 単結晶圧電アクチュエータの試作

2.3.1 積層型圧電アクチュエータ

圧電結晶板それぞれを同じ方向に変位させるためには、厚み方向の分極が逆になり、且つ、せん断歪みの方向が等しくなるように交互に重ねること、そして電極間は交互に電氣的に接続させることが必要になる(図 2.5). 結晶板に印加される電界の方向は一枚毎に逆となるため、ただ重ねるだけでは、図 2.5 左図のようになってしまう. ここでは、X 軸方向を固定したまま、X 軸周りに 180°回転させて交互に積層することで、図 2.5 右図のような変位の拡大を行った. 電極端子間に電圧を印加するとせん断方向(厚みと垂直な方向)に変位を発生する. せん断歪の圧電歪定数を d_{24} , 積層枚数を N , 印加電圧を V とすると、高さ方向の変位量は式 2.11 のように電圧と変位が比例関係になる.

$$x = Nd_{24}V \quad (2.11)$$

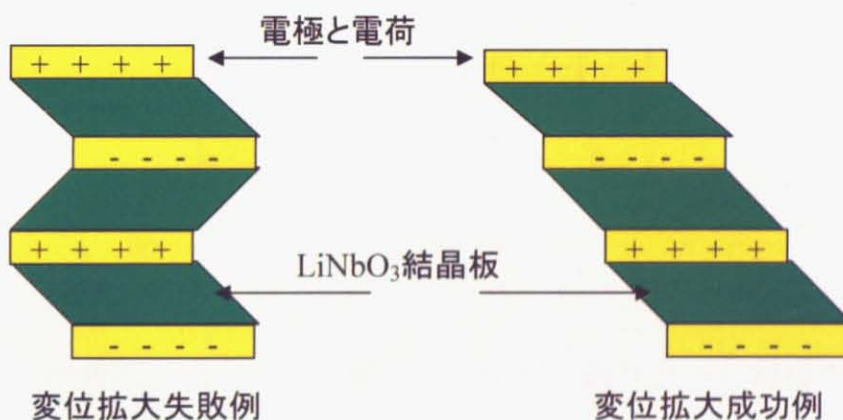


図 2.5 積層型圧電アクチュエータの構造

特徴として、積層させた圧電体の厚さを一定に保ったまま積層数を増やすと、層数が大きくなるに従い印加電圧を小さくできることにある. 言い換えると、印加電圧が一定とすると積層枚数を増やすにつれて変位量は積層枚数倍されるということである. この変位拡大機構を利用して、アクチュエータを試作する.

2.3.2 積層アクチュエータの作製

積層圧電アクチュエータの作製に、本研究では、 $10\text{mm}\times 10\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ の 163° Y-cut の LiNbO_3 結晶板 10 枚を用いて、10 層の積層圧電アクチュエータを作製した。結晶板の間にはさむ電極として、 $10\text{mm}\times 10\text{mm}\times 0.2\text{mm}$ で、電圧を印加するための突起部のついた真鍮板 11 枚を用いた(図 2.6)。結晶板それぞれを同じ方向に変位させるために、厚み方向の分極が逆になるように交互に重ねた。真鍮板と結晶板の接着には、粘性のある導電性接着剤(DOTITE FA-705A)を用い、電気炉(YAMATO DKN302)内で 150°C で 1 時間加熱して導電性接着剤を固化させた。

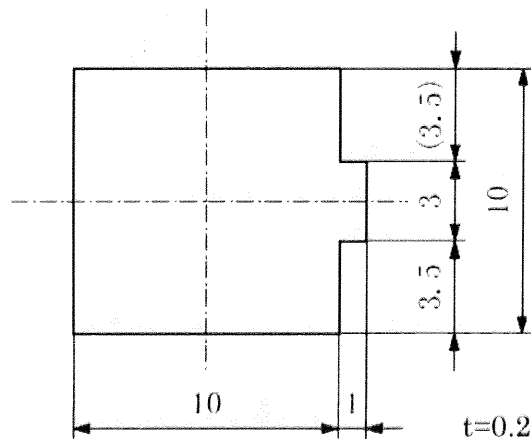


図 2.6 真鍮板電極の形状

電気炉で導電性接着剤を固化して積層を一体化し、隣り合った電極の間が短絡していないことを確かめた後、電極の突起部を短絡する。エポキシ系絶縁性接着剤(Araldite)で突起部間を埋めて固化させた後、その上に導電性接着剤で電氣的に接続させる。アクチュエータは、変位測定時に固定しやすいように、四隅にネジ用の穴を開けたアルミ板に絶縁性接着剤で固定した。作製したアクチュエータの模式図を図 2.7 に、試作積層アクチュエータの写真を図 2.8 に示す。

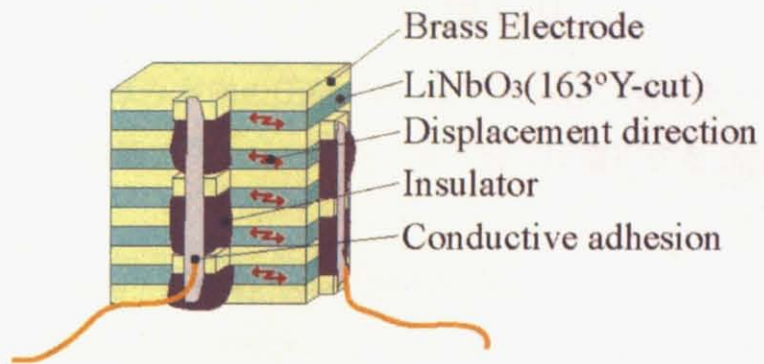


図 2.7 アクチュエータ模式図

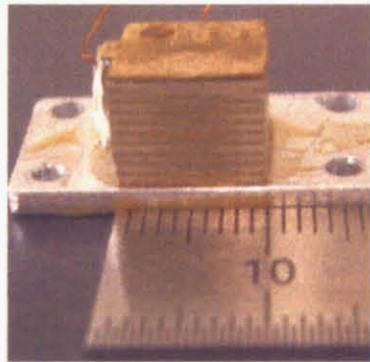


図 2.8 163°Y-cut LiNbO₃ 積層アクチュエータ(10 層)

2.4 試作アクチュエータの特性の見積もり

2.2.2 節で、 163°Y-cut の厚み方向の圧電定数 d_{24} が $66.0(\text{pC/N})$ であることを求めた。したがって、この積層アクチュエータの実効的な圧電定数を d_{effect} とおくと、

$$d_{effect} = 10 (\text{層}) \times d_{24} = 660(\text{pC/N})$$

となり、PZT (圧電定数 $d_{24} = \text{約 } 496(\text{pC/N})$) に匹敵する圧電変位を得ることが可能である。ここで、圧電定数の単位 (pC/N) は式 2.12 のように変換でき (pm/V) となる。

$$\frac{\text{pC}}{\text{N}} = \frac{\text{pm}}{\text{N} \cdot \text{m} \cdot \frac{1}{\text{C}}} = \frac{\text{pm}}{\frac{\text{J}}{\text{C}}} = \frac{\text{pm}}{\text{V}} \quad (2.12)$$

つまり、 $d_{effect} = 660(\text{pC/N})$ ということは、この試作アクチュエータは 100V あたり 66nm の変位が見積もられる。

2.5 蒸着によるアクチュエータ作製

2.5.1 目的

2.4 節までに説明してきたアクチュエータは、作製しやすく、真鍮電極に厚さ(0.2mm)があるため、レーザー干渉計による、せん断方向の変位が測定しやすいという利点があった。しかし、真鍮の電極を挟んでいるために、アクチュエータ全体としては、電気機械結合係数 K や、機械的品質係数 Q が、 LiNbO_3 単体として計算した値と比べて低くなってしまうと考えられる。そこで、真鍮の電極の代わりに、 LiNbO_3 ウエハに Cr と Au を蒸着して電極代わりに使うことで、電極部分の影響を小さくすることを試みた。Cr と Au を双方使ったのは、Cr を介することで Au の蒸着が強固となり、また、合計での厚さを稼ぐためである。

2.5.2 LiNbO_3 ウエハへの Cr, Au 蒸着

図 2.9 の蒸着装置(SANYU ELECTRON:SVC-700)を用いて、 LiNbO_3 ウエハへの蒸着を試みた。使用したのは $t=0.5\text{mm}$ 、 $\phi=3$ インチの 163° Y-Cut LiNbO_3 ウエハで、加熱用抵抗にはタングステンボード(ニラコ:SF-107)を用いた。



図 2.9 蒸着装置

5×10^{-3} Torr 前後まで真空引きした後，Cr の酸化皮膜を飛ばすために 50A で 30 秒ほど待ち，シャッターを開けて 2 分で Cr を蒸着した．その後，Au を 30 秒で蒸着した．ただし，片面は綺麗に蒸着することが出来たが，裏返してもう片面を蒸着しようとしたところ，温度や静電荷による応力がかかったためか，割れてしまった(図 2.10)．



図 2.10 割れた蒸着 LiNbO_3 ウエハ

割れてしまわないように，電極にかける電流値を 50A から 40A と下げ，蒸着時間を 30 秒としたりと，急激な温度変化を避けるように実験もしたが，やはり割れてしまったため，割れたウエハをそのまま使うこととした．割れたとはいえ，その破片は 10mm 角よりは充分に大きいため，積層アクチュエータに使用するのには充分であった．

急激な温度変化を避ける実験においてもウエハが割れてしまったということと，片面だけなら割れずに蒸着できるという事実から，焦電効果によって物体表面への電荷の発生があり，圧電効果による応力の発生や，既に蒸着されている面とこれから蒸着する面での静電荷の差による応力発生も起きているのではないかと考えられる．

2.5.3 アクチュエータの作製

Cr, Au の順に蒸着したウエハをフルウチ化学株式会社へ送り, 積層をお願いした. 積層の方法は図 2.11 に示す通りである. 積層の接着には, 真鍮電極によるアクチュエータ作製と同様のドータイトを用いた.

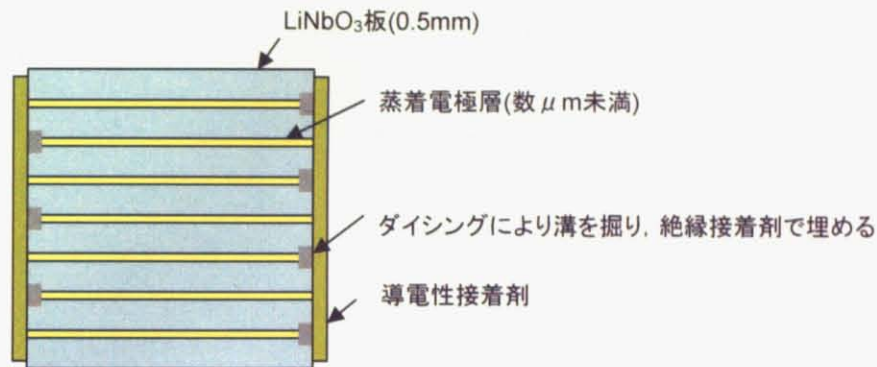


図 2.11 積層および電極の付け方

作製したアクチュエータは図 2.12 に示す. 図 2.12 の通り, 作製途中で一部欠けてしまい, 積層数は 10 層ではなく, 7 層となってしまった. しかし, 7 層でも, 変位は $66 \times 7 = 462$ (pC/N) と見積もられ, アクチュエータとしては充分である.

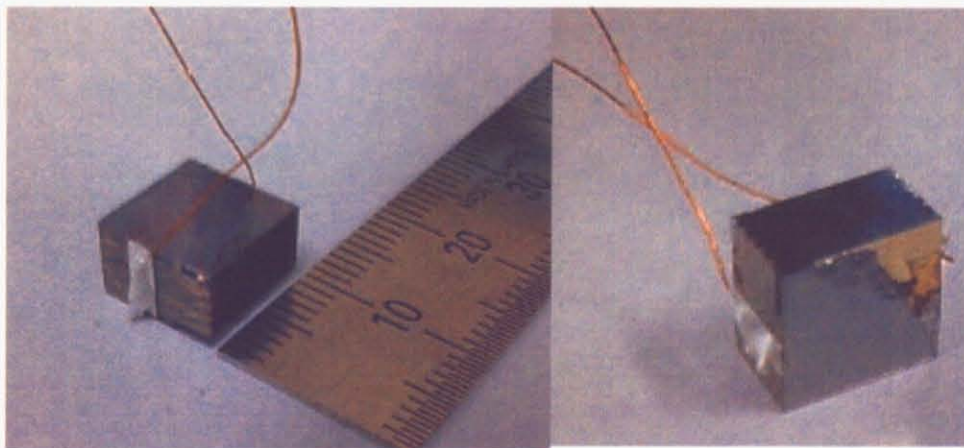


図 2.12 作製した蒸着アクチュエータ

以下の章においては, 特に断りがない限り, 真鍮電極を使ったアクチュエータの結果を示し, 本節で作製した蒸着電極によるアクチュエータは, 「蒸着アクチュエータ」として, 断りを入れて結果を示すこととする.

第3章

試作アクチュエータの 圧電振動特性の評価

3.1 はじめに

前章では、単結晶圧電材料 LiNbO_3 を用いた 10 層の積層アクチュエータの作製について述べた。圧電アクチュエータは、応用するにあたって、その特性を等価回路で表現することが多い。例えばフィルタへの応用の場合、等価回路を用いることによって高度に発達した既存の LC フィルタ設計理論をそのまま適用できる利点がある。機械振動系の電気回路を類推することはメカニカルデバイス設計の基礎である。

本章では、試作したアクチュエータを、将来超音波モータ等の共振アクチュエータに応用する可能性を考慮して、等価回路を用いたモデル化を行なう。これにより、アクチュエータの発生力も計算できる。まず圧電アクチュエータの電気系と機械系の対応とその等価回路について説明し、自由アドミタンス円による等価回路定数の算出について説明する。この算出法をもとに実際に試作アクチュエータのアドミタンス測定を行い等価回路定数の算出を行なう。また、インピーダンスアナライザの機能による等価回路定数の測定結果も同時に記す。

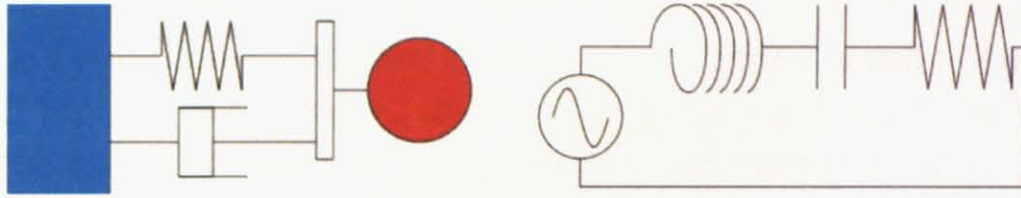
3.2 圧電アクチュエータのモデル化

3.2.1 電気系と機械系の対応

表 3.1 に主要な電気量と機械量の対応を示す。図 3.1 には対応が分かりやすいように質量 - ばね - ダンパモデルとインダクタンス - コンデンサ - 抵抗モデルとそれぞれの運動方程式を示す。力 - 電圧対応の圧電形の電気機械変換子を等価回路表現したものは、図 3.2 になる。 C_d は制動容量、 A は力係数という。

表 3.1 電気系と機械系の対応

電気系	電圧 V [V]	電流 I [A]	電荷 Q [C]	インダクタンス L [H]	キャパシタンス C [F]	抵抗 R [Ω]
機械系	力 F [N]	変位速度 v [m/s]	変位 u [m]	質量 m [kg]	コンプライアンス 1/k [m/N]	機械抵抗 η [kg \cdot m ² /s]



$$m\ddot{x} = F - kx - \eta\dot{x}$$

$$L\ddot{Q} = V - \frac{1}{C}Q - R\dot{Q}$$

図 3.1 機械系モデルと電気系モデル

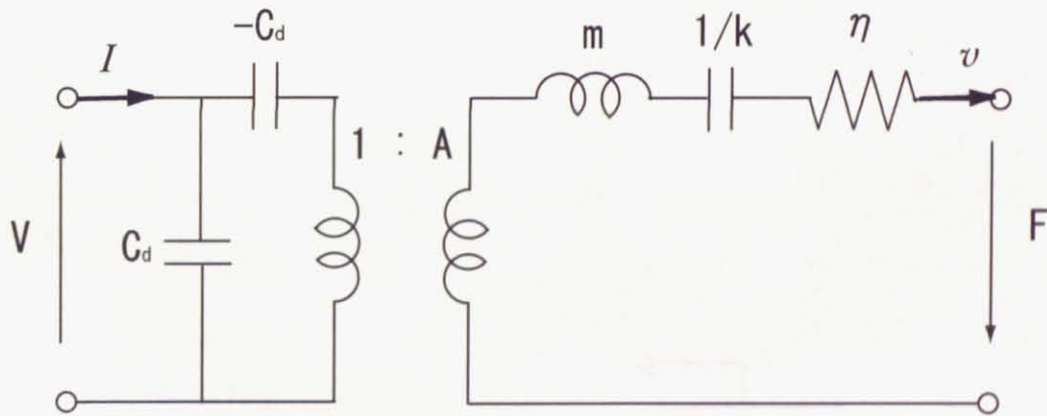


図 3.2 圧電形変換子(縦効果)の等価回路

3.2.2 共振付近で近似した等価回路

振動子に加わる外力が 0 のとき、電気端子から見たアドミタンスを自由アドミタンス Y_f という。圧電振動子は、それぞれ固有の周波数を無数に持っているが、このうちの特定の一つのモードのみを利用することが多い。このとき、図 3.2 を 1 次モードの共振周波数付近で近似した等価回路は、縦効果の場合、図 3.3 のようになり、横効果の場合、 $-C_d$ がなくなり図 3.4 のようになる。図 3.3 の静電容量 $-C_d$ は、圧電縦効果による圧電体の厚み変化分の静電容量の補正にあたる。今回作製したアクチュエータは横効果を用いたものであるため、図 3.4 の等価回路を用いる。その結果、自由アドミタンスは式 3.1 のように表される。また、 Y_M を動アドミタンスという。

この図 3.4 の回路は周波数 f_r で C_1 , L_1 , R_1 による直列共振が起こり、インピーダンスはほぼ 0 になる。これを共振周波数という。またこれより少し高い周波数 f_a では C_d , C_1 , L_1 , R_1 による並列共振が起こり、インピーダンスは無限大となる。これを反共振周波数と呼ぶ。

$$Y_f = j\omega C_d + Y_M \quad (3.1)$$

$$Y_M = \frac{1}{R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} \quad (3.2)$$

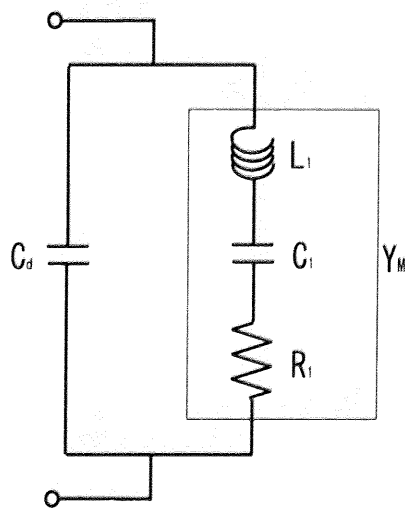
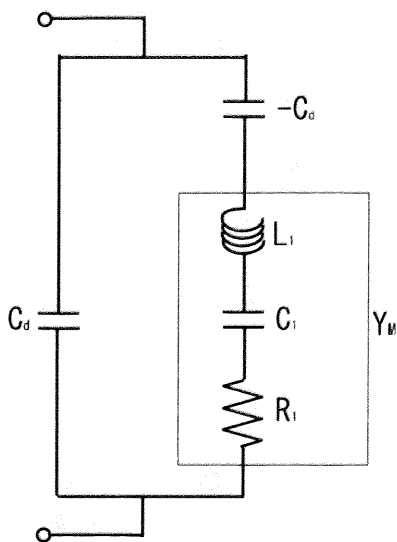


図 3.3 共振付近の等価回路(縦効果)

図 3.4 共振付近の等価回路(横効果)

3.2.3 アドミタンス円による等価回路定数の算出法

図 3.4 の等価回路で示される振動子の自由アドミタンスを、実部であるコンダクタンス G を横軸に、虚部であるサセプタンス B を縦軸に表すと、図 3.5 に示すような円を描く。この自由アドミタンスの円形ループから、等価回路の諸定数を求めることができる。

式 3.1 の自由アドミタンスの項のうち、円を描かせているのは動アドミタンスの項 Y_M であり、制動容量の項 $j\omega C_d$ の虚軸の方向に円を平行移動させているだけなので円の中心の虚数成分が ωC_d にあたる。また、動アドミタンスが実数成分のみになるとき、円の直径が動アドミタンスの実数であることから R_1 が算出される。さらに、動アドミタンスの絶対値が ω_0 の $1/\sqrt{2}$ となるときの角周波数を象限角周波数というが、その差 $\omega_2 - \omega_1$ より、機械的品質係数 Q_1 も求まり、その結果、式 3.3 のように等価回路定数は求まる。

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{Y_M} & Q_1 &= \frac{\omega_0}{(\omega_2 - \omega_1)} \\ L_1 &= \frac{Q_1 R_1}{\omega_1} & C_1 &= \frac{1}{\omega_1^2 L_1} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

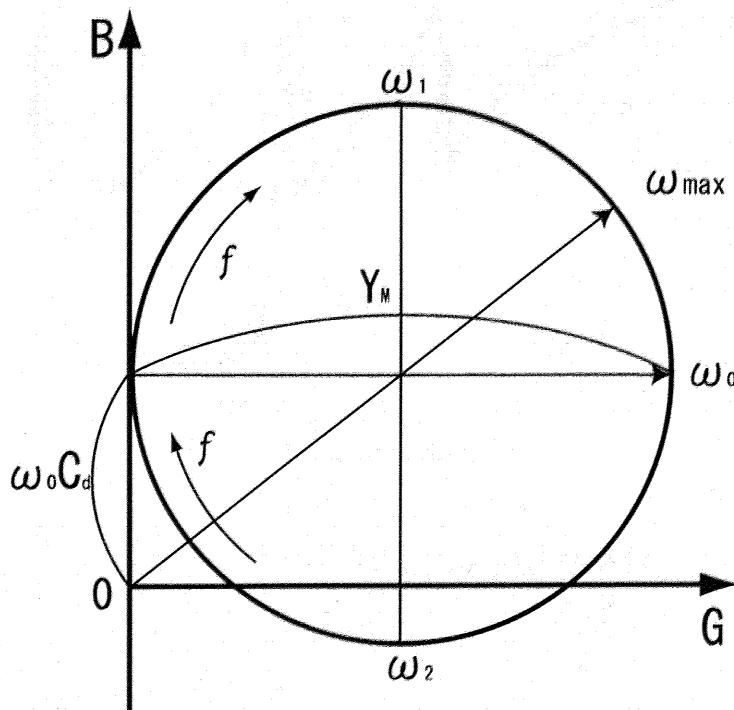


図 3.5 自由アドミタンスの円形ループ

3.3 試作アクチュエータの圧電振動特性の評価

3.3.1 アドミタンス測定と共振周波数

試作アクチュエータのアドミタンスの周波数特性を測定することで、電氣的測定を試みた。また、3.2.3 項で説明したようにアドミタンスループから等価回路の諸定数を算出することを、実際に試作アクチュエータについて行なった。測定には、LCR ハイテスタ (HIOKI :3532) を用いた。測定した周波数は 100kHz から 400kHz までの範囲で、測定ポイントは 601 ポイントとした。結果を図 3.6 に示す。図 3.6 から 216kHz に 1 次モードの共振周波数、223kHz に 1 次モードの反共振周波数が確認できた。また、126kHz、275kHz のピークは、ちょうど 2 倍近くとなっていることから、2.2 節最後に触れた、せん断ではない、横振動の 1 次、2 次モードの共振と考えられる。

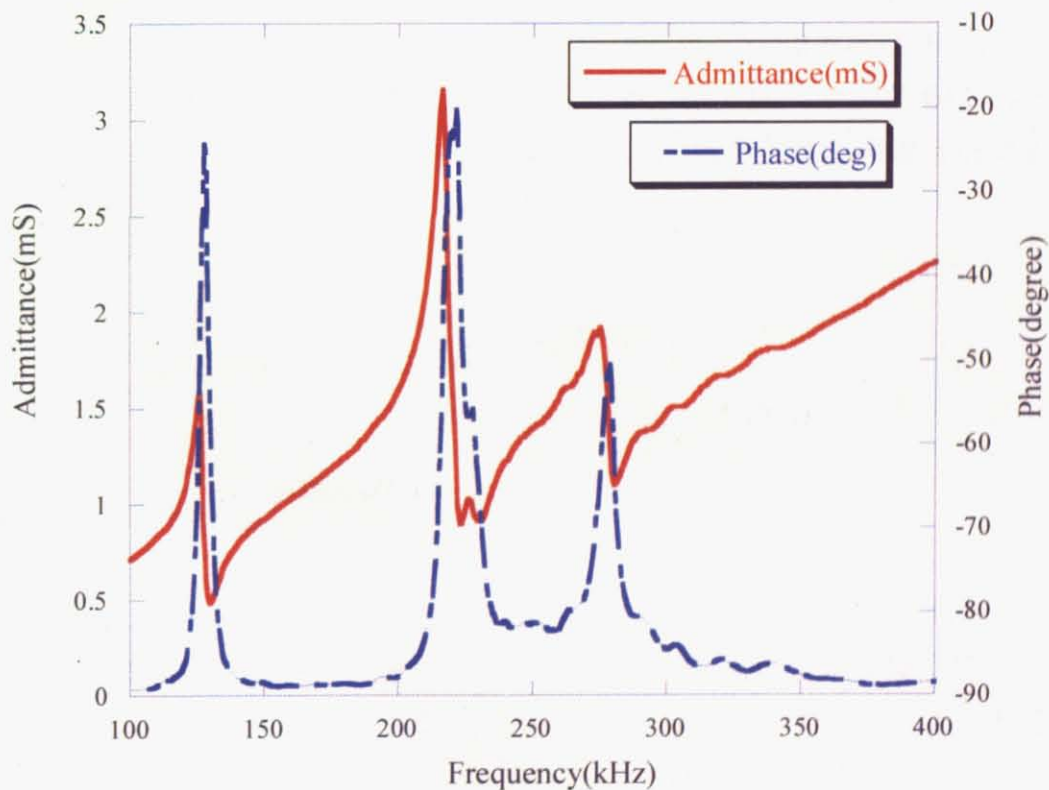


図 3.6 アドミタンスの周波数特性

本アクチュエータの作製に使用したLiNbO₃ ウエハの163° Y-cutのせん断歪みの共振周波数は1.866MHz・mmである¹⁹⁾。本アクチュエータの厚みは、電極および接着剤の厚み(0.4mm)も含め、測定値では7.6mmであったため、共振周波数の計算値は、

$$\frac{1.866\text{MHz} \cdot \text{mm}}{7.6\text{mm}} = 245\text{kHz} \quad (3.4)$$

となる。これは測定値の216kHzと比較すると、1割強の誤差となる。この差は、厚み全てをLiNbO₃としている計算値に対して、実際のアクチュエータでは、真鍮の電極や、LiNbO₃、真鍮と比べて非常に軟らかい接着剤の影響が出てしまうためと考えられる。

また、2.2節の式2.9で示した163°Y-cutのヤング率と、文献値⁹⁾の密度 4.7×10^3 (kg/m³)から求めた音速、実験で用いた結晶板の縦横寸法10mmを用いて計算した横振動の共振周波数は、式3.5のようになった。Y-cutの結晶板では、添え字が「2」の方向を厚み方向(縦方向)とするため、横方向のヤング率は c_{13} や c_{31} に相当する。結晶板の寸法を2倍しているのは、境界条件が両端自由であるためである。

$$v_{13} = v_{31} = \sqrt{\frac{c_{31}(\text{N/m}^2)}{\rho(\text{kg/m}^3)}} = \sqrt{\frac{0.5 \times 10^{11}}{4.7 \times 10^3}} \cong 3260(\text{m/s}) \quad (3.5)$$

$$f_r = \frac{v}{\lambda} = \frac{3260(\text{m/s})}{10(\text{mm}) \times 2} = 163(\text{kHz})$$

この結果は、測定値である126kHzとは離れているが、オーダーは正しいこと、接着剤などによって質量が増えて、理論値より実際は共振周波数が低下していくことを考えると、126kHz、275kHzのピークが横振動の共振と考えられる。

3.3.2 アドミタンスループによる等価回路定数の導出

アドミタンスループを表示させるために 1 次モードの共振周波数の見られた 216kHz 付近で自由アドミタンスの実数部分であるコンダクタンス G と虚数部分であるサセプタンス B の周波数特性を測定し、アドミタンスループを表示させた(図 3.7).

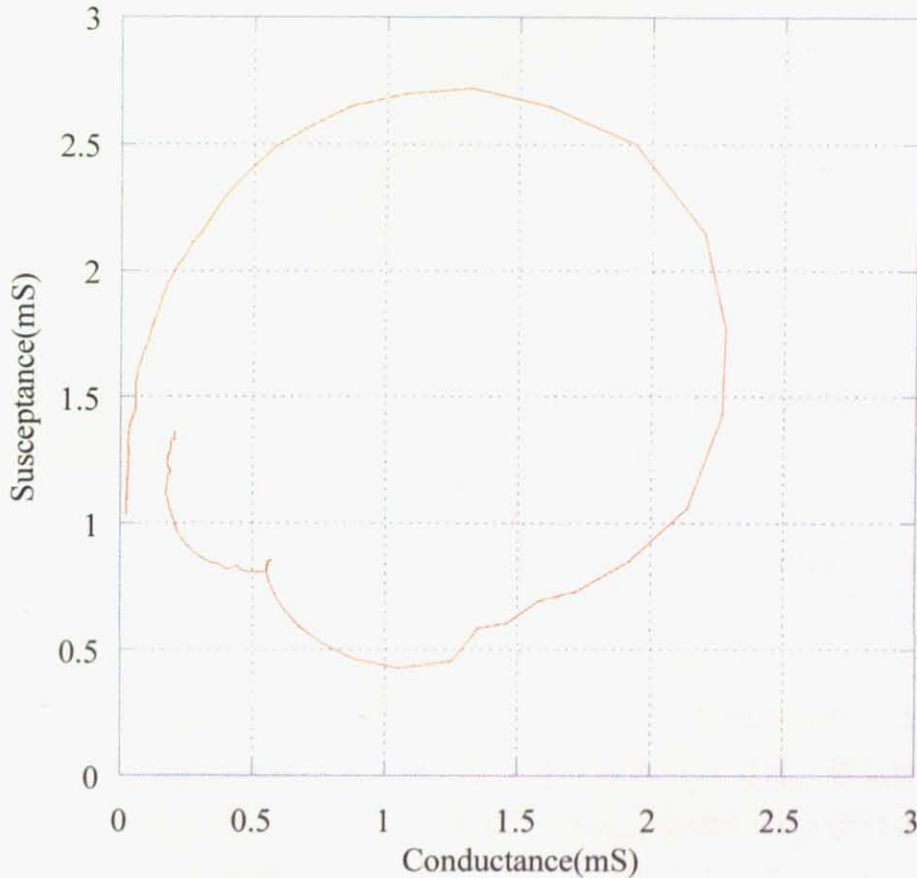


図 3.7 アドミタンスループ

アドミタンスループより、等価回路の諸定数は式 3.3 を用いて以下のように求まった.

表 3.2 等価回路諸定数

R	L	C	C_d	Q
440.5	10.92	50.25	1.049	33.46
[Ω]	[mH]	[pF]	[nF]	

3.3.3 インピーダンスアナライザによる等価回路定数測定

インピーダンスアナライザ(Agilent Technology:4294A)は、アドミタンス測定と同時に、等価回路定数を算出して表示することができる。この機能を用いて、等価回路定数(R , L , C , C_d)を測定し、その値から、電気機械変換効率 K^2 、電気機械結合係数 K 、機械的品質係数 Q を計算した。電気機械変換効率 K^2 と等価回路定数については、式 3.5 の関係があることが知られている。結果を表 3.3 に示す。蒸着アクチュエータの値や、前節での計算結果である表 3.2 の値も、計算値として記した。

$$k^2 = \frac{C}{C + C_d} \quad (3.5)$$

表 3.3 等価回路定数

	$R(\Omega)$	$C(\text{pF})$	$L(\text{mH})$	$C_d(\text{pF})$	$K^2(\%)$	$K(\%)$	Q
真鍮電極アクチュエータ	443	44.9	11.3	1143	3.8	19.4	36.1
表 3.1 の計算値	440	50.3	10.9	1049	4.6	21.4	33.5
蒸着電極アクチュエータ	299	117	0.61	378	23.6	48.6	7.6

この結果より、インピーダンスアナライザによる測定値と、アドミタンスループからの計算値が非常に近い値となっていることが確認できた。また、電極を真鍮から Cr と Au の蒸着へと変更したアクチュエータでは、電気機械変換効率の大幅な上昇が見られた。ただし、本来、 LiNbO_3 単体での Q 値は数万といわれているため、電極の影響が小さくなることで上昇すると考えられた機械的品質係数 Q の値は減少してしまった。これは、電極の影響が小さくなることで、 LiNbO_3 以外でアクチュエータ作製に共通で使用されている物質である、接着剤の影響が相対的に増してしまっただめではないかと思われる。エポキシ系の接着剤であるドータイトは、 LiNbO_3 、真鍮と比べると著しく剛性が低い。