バイモルフ型 piezo 部材で出力補強される 積層型素子駆動変位拡大機構*

小泉邦雄** 笹木 亮** 佐々木基文*** 岡部佐規一† 横山恭男††

Piezo-stack Driven Type Displacement Magnification Mechanism
Reinforced by Bimorph Piezoelectric Members

Kunio KOIZUMI, Tohru SASAKI, Motofumi SASAKI, Saki-ichi OKABE and Yasuo YOKOYAMA

This paper deals with fundamental characteristic of the mechanism which consists of lever and toggle mechanisms. The mechanism is chiefly actuated by twin multilayer piezoelectric actuators. It can locate minutely and quickly for mechanical working and handling of some minute and thin objects. The lever members were made from a bimorph type piezoelectric actuator. As they were connected by elastic joints, the mechanism has no clearance and no friction. The mechanism is based on two concepts. In the first, mechanical stiffness of the members is variable and reinforced by additional electrical stiffness due to actuation of the bimorph members. Therefore the members can take smaller mechanical stiffness and inertia. The second, it can be variable input-output characteristic of a piezo-stack actuator and correct deviated position of an output point by additional actuation of the bimorph members. With the experimental mechanism, the resolution is $1.57 \mu\text{m}$.

Key words : displacement magnification, flexible mechanism, bimorph type piezoelectric actuator, multilayer piezoelectric actuator

1. 緒 言

2. 記 号

積層型 piezo 素子は、高い応答性を持ち、微小変位と大きな力が得られるアクチュエータとして、精密位置決めを要する加工やハンドリング技術に広く応用されている。その出力特性は、発生する力に対して変位が非常に小さく¹⁾²⁾、アンバランスであるため、これを用いる駆動メカニズムには変位拡大機能を要する場合が多い。変位拡大機構としては、レバーの組合せが多く、座屈を用いるものもある³⁾。これらの変位拡大機構では入出力の関係が一義的に決まり、出力特性を任意に変化させることはできない。

本研究では、レバーとトグルを組合せた一体形状のシム材に piezo 板¹⁾を貼り、各部をバイモルフ部材で構成した機構で積層型素子の変位を拡大し、さらにバイモルフ部材で出力を補強するフレキシブルな構造を提案して、検討を加えた。従来のリンク機構では、入力変位に対する出力の変位と力の関係が固定されているのに対して、本機構では、部材をバイモルフ型 piezo 素子で構成し、発生する曲げモーメントで機械的剛性を補い、出力特性を変え、任意の力と変位の出力が得られる。さらに、曲げモーメントを動的に変化させたり、個々の部材を独立に駆動することで、出力点を二次元的に動かすフレキシビリティを持たすことができる。また、機構の奥行きが部材の幅程度に抑えられるため、多数をコンパクトに並列配置できるので、順送型微小機構にも適している。

本報では、変位拡大機構の基本動作特性を解析し、バイモルフ部材の駆動による積層型素子の特性の変化について述べる。

f_{in} , x_{in} : 入力力および変位, f_{out} , y_{out} : 出力力および変位,
(f_{in})_{max}, (x_{in})_{max}: 積層型素子の最大発生力および変位, m_{oa} , m_{ob} :
レバー部とトグル部のバイモルフ部材の発生曲げモーメント, EI_i :
部材 i の曲げ剛性 (i は図 2 中の部材番号 ① ~ ⑩), l_i : 部材 i の長さ,
 θ_a , θ_b : レバー部とトグル部のオフセット角, f_j , m_{oj} : 節点 j (j は図
2 中の節点 A ~ K) に作用する反力および反モーメント, u_j , θ_j : 節
点 j の部分座標におけるたわみとたわみ角, f_x : 節点 K に作用する
 x 軸方向の力, t : バイモルフ部材の全厚さ, t_c : シム材の厚さ, b :
部材の幅, e : 圧電応力定数, d_{31} : 圧電ひずみ定数, v_{in} , (v_{in})_{max}:
積層型素子の印加電圧および最大電圧, v_{in}' : バイモルフ部材の
印加電圧, k_x : 入出力点間の剛性, $2W_x$: k_x に蓄えられるエネルギー,
 $w = (f_{ax})_{max} \cdot (y_{ax})_{max} / 2$: 機構の仕事能力, $k_x = (f_{in})_{max} / (x_{in})_{max}$: 積層型
素子の機械的剛性, $l_a = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5$, $l_b = l_6 + l_7 + l_8$, $l_c = l_9 + l_{10}$
として、無次元量を $L_i = l_i / l_4$, $K_i = EI_i / EI_4$, $X_{in} = x_{in} / l_4$, $Y_{out} = y_{out} / l_4$,

Fig.1 Output characteristic of actuator with the mechanism

* 原稿受付 平成9年2月17日

** 正会員 富山大学工学部(富山市五福3190)

*** 富山大学工学部

† 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

†† 正会員 石川工業高等専門学校(石川県河北郡津幡町北中条)

Fig.2 Principle model of mechanism

$$V_{in} = v_{in} / (v_{in})_{max}, \quad F_j = f_j / (EI_4 / l_4^3), \quad M_{oj} = m_{oj} / (EI_4 / l_4), \\ K_j = k_j \cdot l_4^3 / EI_4, \quad K_x = k_x \cdot l_4^3 / EI_4, \quad W = w / (EI_4 / l_4) \text{ とする.}$$

3. 駆動原理

積層型素子は、印加電圧で発生する変位と力の関係が直線的に変化するが、変位が微小で力が大きいため、これを図1に示すと、破線のように力に偏ったアンバランスな関係となっている。ここで記号は2で定義した無次元量である。変位拡大機構を用いて、実線のようにこの出力の変位と力の関係をバランスのよい状態に変換できれば、積層型素子の発生変位を増大させ、目的に応じた出力特性が得られる。本機構は、図2に示すような形状をしており、(a)部の両側下部の対向した積層型素子に入力を加えて水平方向の変位 x_{in} 、力 f_{in} を生じさせる。(a)のレバー部で1段目の変位拡大をした後、(b)のトグル部で2段目の変位拡大をして(c)部の出力端から出力の変位 x_{out} と力 f_{out} を得る。レバー部とトグル部の結合には弾性関節を用いて、ガタや摩擦を除いている。図3の破線のように、レバー部とトグル部のバイモルフ部材を駆動しないとき、部材の曲げ剛性が小さいために、たわみが大きく、出力変位は減少する。この部材のたわみを減らして元に戻す方向にバイモルフ部材を駆動することで、1点鎖線のように剛性の低下が補償され、出力を補強できる。このように、バイモルフ部材の印加電圧で部材の曲げ剛性を変化できるので、機構の機械的剛性を補償して、積層型素子の出力特性が可変となり、発生すべき力と変位が得られる。また、バイモルフ部材を独立に駆動すれば、製作誤差による出力点動作の芯のずれ、傾きおよび、蛇行等の補正が可能となる。主駆動源である積層型素子とバイモルフ部材との駆動機能の分担が可能となり、残留振動の抑止や高周波振動の重畳など、フレキシブルな動作が可能である。

4. 動作

図2に示すモデルの形状と材質は左右対称であり、積層型素子および各バイモルフ部材に作用する力およびモーメントも含め、部材①～⑩を部分(a), (b), (c)に分け、はり要素として各節点A～Kのたわみを計算する。つぎに、直線部(b)の部分座標の原点を(a)の端点に、(c)の原点を(b)の端点にそれぞれ移動し、各部のはりの端のたわみとたわみ角を求めて、その和より出力点の絶対変位と角度が得られる。これより、機構の入出力特性を求める。

A-F間の直線部(a)の端点Fに作用する力およびモーメントを、出力点における力とモーメントで表すと、次式となる。

$$f_F = f_x \cos \theta_a - (f_{out} / 2) \sin \theta_a \quad (1)$$

$$m_{oF} = l_b f_x \sin \theta_b - (f_{out} / 2) \cdot (l_c + l_b \sin \theta_b) - m_{oK} \quad (2)$$

Fig.3 Deflection of member in mechanism

ここで、バイモルフ部材に曲げモーメントが発生するが、部材中央面の上半分についてのユニモルフ部材を仮想して、部材(a)の厚み方向に y 軸、幅方向に z 軸をとると、印加電圧によって生ずるひずみでD-E間に発生する曲げモーメント m_{oa} は、次式で表される⁴⁾。

$$m_{oa} / 2 = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{l_c/2}^{l/2} e \frac{v_{in}'}{t - l_j} dy dz = (-t / 4) \cdot (1 + t_c / t) \cdot e b v_{in}' \quad (3)$$

このとき、曲げモーメントによる部材のたわみ u_{D-E} は次式となる。

$$u_{D-E} = (m_{oa} / 2) \cdot l_4^2 / 2EI_4 = 3(e / E) \cdot (l_4 / t)^2 \cdot (1 + t_c / t) \cdot v_{in}' \quad (4)$$

ここで、 e / E は与えた電界の強さ当たりの生じたひずみ、すなわち横効果素子の圧電ひずみ定数 d_{31} に等しい。従って式(3)は

$$m_{oa} = 3d_{31} \cdot (l_4 / t)^2 \cdot (1 + t_c / t) \cdot (EI_4 / l_4^2) \cdot v_{in}' \quad (5)$$

となり、バイモルフ部材に発生するモーメント m_{oa} は印加電圧 v_{in} に比例する。以上のことは直線部(b)についても同様である。

B-D間は十分大きな剛性を持たせるので、剛体とみなす。

D-E間に曲げモーメント m_{oa} が発生するときに、(a)部のF端に発生するたわみ u_F とたわみ角 θ_F は

$$u_F = a_{u4} f_{in} \cos \theta_a + g_{u4} f_K + b_{u4} f_{out} / 2 + h_{u4} m_{oK} + c_{u4} m_{oa} \quad (6)$$

$$\theta_F = a_{\theta4} f_{in} \cos \theta_a + g_{\theta4} f_K + b_{\theta4} f_{out} / 2 + h_{\theta4} m_{oK} + c_{\theta4} m_{oa} \quad (7)$$

ここで、 a_{ui} , g_{ui} , b_{ui} , h_{ui} , c_{ui} は部材 i のたわみに関する係数、 a_i , g_i , b_i , h_i , c_i は、たわみ角に関する係数である。

同様に(b), (c)部の端点I, Kのたわみとたわみ角はそれぞれ

$$u_I = g_{u8} f_K + b_{u8} f_{out} / 2 + h_{u8} m_{oK} + d_{u8} m_{ob} \quad (8)$$

$$\theta_I = g_{\theta8} f_K + b_{\theta8} f_{out} / 2 + h_{\theta8} m_{oK} + d_{\theta8} m_{ob} \quad (9)$$

$$u_K = b_{u10} f_{out} / 2 + h_{u10} m_{oK} \quad (10)$$

$$\theta_K = b_{\theta10} f_{out} / 2 + h_{\theta10} m_{oK} \quad (11)$$

d_{ui} , d_i は、たわみとたわみ角に関する係数である。

(b), (c)部の座標原点を、それぞれ(a), (b)部端点に移動して、式(6)～(11)よりたわみとたわみ角を加えると、出力点Kの変位は

$$x_{out} = -u_F \cos \theta_a - u_I \sin \theta_b - \theta_F (l_b \sin \theta_b) \quad (12)$$

$$y_{out} = -u_F \sin \theta_a - u_I \cos \theta_b - \theta_F (l_b \cos \theta_b + l_c) - \theta_I l_c - u_K \quad (13)$$

$$\theta_{out} = -\theta_F - \theta_I - \theta_K \quad (14)$$

となる。形状および駆動を左右対称とすれば、K点で境界条件

$$\theta_{out} = 0, \quad x_{out} = 0 \quad (15)$$

が成り立つ。各係数を $a'_n, b'_n, d'_n, c'_n, g'_n$ と置き直し、式(15)の第1式より、式(7),(9),(11)を用いて、次式

$$m_{oK} = a'_1 f_{in} \cos \theta_a + g'_1 f_r + b'_1 f_{out} / 2 + c'_1 m_{oa} + d'_1 m_{ob} \quad (16)$$

同じく第2式に、式(6),(7),(8)を用いて次式を得る。

$$f_r = a'_2 f_{in} \cos \theta_a + b'_2 f_{out} / 2 + c'_2 m_{oa} + d'_2 m_{ob} \quad (17)$$

式(17)を式(16)に代入して、次式となる。

$$m_{oK} = (a'_1 + g'_1 a'_2) f_{in} \cos \theta_a + (b'_1 + g'_1 b'_2) f_{out} / 2 + (c'_1 + g'_1 c'_2) m_{oa} + (d'_1 + g'_1 d'_2) m_{ob} \quad (18)$$

式(6)~(10)に式(17),(18)を代入して m_{oK}, f_r を消去し、各係数をまとめ、無次元化して A_n, B_n, C_n, D_n と表すと、入力変位 X_{in} と出力変位 Y_{out} は次式のように、 F_{out}, F_{in}, M_{oa} および M_{ob} についての1次結合で表せる。

$$Y_{out} = A_1 F_{in} + B_1 F_{out} + C_1 M_{oa} + D_1 M_{ob} \quad (19)$$

Fig.4 Change of coefficient with attaching angle of toggle member

$$X_{in} = A_2 F_{in} + B_2 F_{out} + C_2 M_{oa} + D_2 M_{ob} \quad (20)$$

ここで、図1のような、積層型素子が発生する変位と力の直線的な関係は、次式で表される。

$$F_{in} = K_s \{ (X_{in})_m \cdot V_{in} - X_{in} \} \quad (21)$$

式(19)~(21)より、 X_{in}, F_{in} を消去すると、本機構の特性は次式

$$\Xi \equiv Y_{out} + B_v F_{out} = A_v V_{in} + C_v M_{oa} + D_v M_{ob} \quad (22)$$

で示される。ただし、

$$A_v = \frac{A_1 (F_{in})_{max} \cdot (X_{in})_{max}}{A_2 (F_{in})_{max} + (X_{in})_{max}}, B_v = B_2 \frac{A_1 (F_{in})_{max}}{A_2 (F_{in})_{max} + (X_{in})_{max}} - B_1, \\ C_v = C_1 - C_2 \frac{A_1 (F_{in})_{max}}{A_2 (F_{in})_{max} + (X_{in})_{max}}, D_v = D_1 - D_2 \frac{A_1 (F_{in})_{max}}{A_2 (F_{in})_{max} + (X_{in})_{max}}$$

式(22)で、出力を表す左辺 Ξ は、右辺第1項の積層型素子による分、第2および第3項のレバー部とトグル部のバイモルフ部材による分の和であることを示している。左辺第1項の出力変位 Y_{out} を大きく取れば、その分、第2項の発生力 F_{out} は減少することになる。

積層型素子による出力係数 A_v は、印加する電圧 V_{in} の比例係数であり、図4(a)の1点鎖線のように、極大となるトグル部材のオフセット角 θ_b が存在する。破線で示す剛体部材のリンク機構に比べ、部材のたわみと弾性関節のための損失で、 A_v は小さくなるが、関節の曲げ剛性 K_i を小さくすれば、低下を抑えられる。機構全体のコンプライアンスである B_v が大きければ、入力 V_{in}, M_{oa}, M_{ob} で、ある出力変位 Y_{out} のときに、発生力 F_{out} は小さくなる。同図(b)のように、関節の曲げ剛性 K_i を小さくすれば、 A_v と同様に増大する。また、レバー部およびトグル部のバイモルフ部材が発生するモーメント M_{oa} および M_{ob} の出力係数である C_v, D_v は同図(c)のように、両者の絶対値は1点鎖線で示す A_v が極大となるオフセット角でほぼ極大となり、発生モーメントが効率よく働くので好都合である。

ここでは、 A_v が極大となるトグル部材のオフセット角を最適角として後述の設計に用いることにする。 D_v は C_v に比べて小さいので、出力の補強はレバー部材で行い、トグル部材の駆動は、出力点の芯出しや高周波振動の重畳など、付加的に用いるのが良い。

積層型素子だけによる駆動は $M_{oa}, M_{ob} = 0$ の場合であり、このときの式(22)の左辺を機構の出力 Ξ_A とする。これにレバー部材の発生モーメントが付加された出力 Ξ_{AC} は、 $M_{ob} = 0$ の場合であり、トグル部材が付加された出力 Ξ_{AD} は、 $M_{oa} = 0$ の場合である。

入力 $V_{in} = 1, M_{oa} = 1$ のときの Ξ_A と Ξ_{AC} との比で、レバー部バイモルフ部材の駆動で出力補強するブースト効果を表すと、次式

$$\Xi_{AC} / \Xi_A = 1 + C_v / A_v, \quad (23)$$

$$K_i = 1.00, L_i = 1.00, L_i = 0.05 (i = 1, 5, 6, 8, 9), L_{2,3,10} = 0.20, \theta_a = 0^\circ$$

Fig.5 Change of boost effect with offset angle of toggle member

同様に、トグル部バイモルフ部材の駆動によるブースト効果は、

$$\Xi_{A,D} / \Xi_A = 1 + D_V / A_V \quad (24)$$

となる。図5の縦軸の絶対値はレバー部のバイモルフ部材の駆動によるブースト効果の大きさを、符号はモーメントの向きを表す。図中の1点鎖線は積層型素子の出力係数 A_v が極大となる最適角であり、オフセット角を大きくするとブースト効果が増すが、この最適角以上ではオフセット角を大きくする意味が薄れるので、トグル部材のオフセット角は最適角にとるのがよいと思われる。トグル部材のブースト効果も同様に、最適角以上では変化が少ない。

5. 機構の設計

バイモルフ部を駆動するとき、最大発生変位および最大発生力は、式(22)で、 $F_{out} = 0$ 、 $Y_{out} = 0$ として、それぞれ次式で表せる。

$$(Y_{out})_{max} = A_v, (F_{out})_{max} = A_v / B_v \quad (25)$$

ある入力で発生する変位と力を同時に大きくすることはできないため、図1のように発生力と変位の特性線が囲む面積で、仕事の能力 W を評価する。 K_i ($i=1,5,6,8,9$)の値によって特性線の傾きが変わるため、 K_i の選び方で、 Y_{out} と F_{out} の関係を任意に定めることができる。 W は機構に蓄えられるエネルギーを表し、次式となる。

$$W = (F_{out})_{max} \cdot (Y_{out})_{max} / 2 = w \cdot (EI_4 / l_4) / 2 \quad (26)$$

剛体部材を用いたリンク機構ならば、関節の曲げ剛性は無く、無関係ゆえ W 一定であるが、本機構では、部材がたわむので一定とならず、図6のように W を極大とする K_i の値が存在する。また K_i が小さければ、関節長さ L_i ($i=1,5,6,8,9$)により部材のたわみが変わり、 W が変化するため、 L_i と K_i に対して、 W は極大値を持つ。 W の極大条件での最大出力の変位 $(Y_{out})_{max}$ および力 $(F_{out})_{max}$ を図7(a)に、このときの関節長さ L_i とトグル部材長さ L_7 を図7(b)に示す。所要出力として、ある $(Y_{out})_{max}$ と $(F_{out})_{max}$ が設計条件として与えられた場合、図(a)から θ_a 、 K_i が得られ、これより図(b)から L_i 、 L_7 が求められる。

本機構の入出力点間の剛性 K_s を積層型素子の負荷ばねと考えると、入力点に作用する力は次式となる。

$$F_{in} = K_s \cdot X_{in} \quad (27)$$

これは素子側の式(21)と等しく、機構に蓄えられるエネルギーは⁵⁾

$$W_s = \left\{ K_s K_x^2 / 2(K_s + K_x)^2 \right\} (X_{in})_{max}^2 \quad (28)$$

W_s は $K_s = K_x$ で、次の極大値をとる。

$$(W_s)_{max} = (F_{in})_{max} \cdot (X_{in})_{max} / 8 \quad (29)$$

ある電圧での積層型素子単体の仕事能力 w_{in} は次式で定義される。

$$W_{in} = (F_{in})_{max} \cdot (X_{in})_{max} / 2 \quad (30)$$

したがって、積層型素子から取り出せる出力エネルギーの極大値は、積層型素子の仕事能力の1/4である。本機構は積層型素子を2個用いるので $(W_s)_{max}$ の2倍が機構の持つ仕事能力の極大値であることから、

$$W \leq 2(W_s)_{max} \quad (31)$$

したがって、式(26)および(29)より、次の関係が得られる。

$$(F_{out})_{max} \cdot (Y_{out})_{max} \leq (F_{in})_{max} \cdot (X_{in})_{max} / 2 \quad (32)$$

本機構を用いて、積層型素子の特性を変更しようとするとき、目的の所要特性は式(32)の条件を満たさなければならない。

図8に示す設計手順では、まず、式(32)を満たす $(Y_{out})_{max}$ 、 $(F_{out})_{max}$ を決め、機構全体の大きさを考慮して基本となるレバー部材④の寸法と曲げ剛性を定める。つぎに、図7を用いて $(Y_{out})_{max}$ 、 $(F_{out})_{max}$ の交点から

θ_a 、 K_i 、 L_i ($i=1,5,6,8,9$) および L_7 を求め、機構の諸元が決定される。

6. 実験

前述の設計手法で試作した変位拡大機構を図9に示す。曲げ成形したりん青銅のシム材($t0.25 \times 9 \text{ mm}$)の4か所にPZT板(村田製作所、P-7、 $t0.2 \times 9 \times 28 \text{ mm}$)¹⁾を接着剤(電気化学工業、ハードロックG-55)で接着して並列接続型バイモルフ部材を構成し、

Fig.6 Change of work capacity with joint stiffness

(a) Output force and displacement

(b) Length of toggle and lever member

$K_7 = 1.00, L_{2,3,10} = 0.2, \theta_a = 0^\circ, (X_{in})_{max} = 7 \times 10^{-4}, (F_{in})_{max} = 2.0$

Fig.7 Reading off diagram for design

Fig.8 Design procedure

Fig.9 Experimental apparatus

Fig.10 Change of output characteristic with bending moment of bimorph member in lever member

Fig.11 Change of boost effect with additional bending moment

両端をスリットに差込んで接着した後、ベースにばね押えて固定した。入出力点は鋼板(13mm)を接着して補強した。積層型素子と拡大機構との結合部は鋼球($\phi 3\text{mm}$)を用いて点接触とし、レバー部が自由に傾き、常にレバー部材に垂直な力が作用するようにした。積層型素子(トーキン, NLA-10 $\times$ 10 $\times$ 18, 15 μm , 3.50 kN/100V)には、ねじで与圧力を与えた。出力点の変位は静電容量型変位計(岩通テクノシステム, ST-3701, ST-0518S17),

発生力は圧電型ロードセル(KISTLER, 9011A)で検出される。

無負荷状態で、積層型素子の印加電圧とレバー部材の発生モーメントを変化させたときの発生変位を図10に示す。積層型素子のヒステリシスは、測定誤差の範囲内であった。白丸印はレバー部のパイモルフ部材を駆動せず、ブースト効果がないときを、また、黒丸印はレバー部材にモーメント $M_{oa} = -13.13 \times 10^{-3}$ を発生させたときを示す。この範囲内で印加電圧を調節すれば、任意の出力が得られる。二重丸印は下の M_{oa} の値でモーメントを変化させた場合である。無負荷の状態でパイモルフ部材を駆動しない場合、印加電圧の変化量が最低3.2Vで最小分解能1.57 μm を得た。機構は、積層型素子の最大許容電圧の80%までは線形性を保った。慣性負荷をかけた場合の発生力と変位の関係を図11に示す。1点鎖線は主駆動源である積層型素子の出力特性を示す。積層型素子の印加電圧 $V_{10}=1.0$ として、さらに部材に曲げモーメントを発生させれば、矢印のように出力の変位と力が増加する。これは、パイモルフ部材の駆動により、単に変位拡大だけでなく、仕事能力を増した出力特性に変えられることを示している。

7. 結 論

- (1) 部材曲げ剛性をパイモルフ部材で可変にし、これを等価的に増やして、その分部材を軽量化できる考え方を提案した。
- (2) パイモルフ部材の発生するモーメントを変化させることで、積層型素子の出力特性を任意に変化できる。
- (3) 積層型素子による出力と、パイモルフ部材の出力重畳効果におけるトルク部の最適オフセット角はほぼ等しい。
- (4) 仕事能力を極大にする関節曲げ剛性と長さが存在する。
- (5) 無負荷時で、最小分解能1.57 μm を得た。

本研究の遂行に協力された町田利雄氏(現・アイシン精機㈱)並びに㈱富山村田製作所に感謝いたします。また、本研究の一部は、平成3年度文部省科学研究費補助金(一般研究(c))によって行われたことを記し、関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 圧電セラミックス(ピエゾタイト), ㈱村田製作所, P19-3 (1990).
- 2) 積層型圧電アクチュエータ技術資料, ㈱トーキン, VR-014, Vol.01 (1989).
- 3) 清水成章, 河野英一: 積層型圧電アクチュエータ素子とその応用, 自動化技術, 19, 9 (1987) 24.
- 4) 抜山平一, 鈴木辰男: M型圧電振動子の振動状態とその電気音響定数, 通信学会誌, 231 (1942) 367.
- 5) 矢野健, 高橋貞行: インパクトプリンタヘッドへの圧電縦効果の適用, 電子情報通信学会論文誌C, Vol.J71-C, 11 (1988) 1576.