

圧電素子の非線形性を利用したマイクロ移動機構の研究*

(駆動原理の理論的検討)

古畑 義治 , 堀地 一久 , 岡部 宏 , 坂野 進

A Research on Micro step Mechanism utilizing Hysteresis of Piezoelectric Element (Analytical Investigation of Driving Principle)

Yoshiharu Furuhashi , Kazuhisa Horichi , Hiroshi Okabe , Susumu Sakano

Dept. of Mechanical Engineering, College of Engineering, Nihon University
1 Nakagawara, Tokusada, Tamura-cho, Koriyama-shi, Fukushima, 963 - 8642

The small actuator utilizing the bimorph piezoelectric device had been developed . But, it had been difficult that the actuator produced the large force because the phenomenon of the sliding contact was used as the driving principle . The another driving principle of the actuator has been found on the basis of the above-mentioned research. The hysteresis of the material was utilizing as the driving power of the actuator . It was clarified experimentally that the moving mechanism moved to right and left by the frequency of the power applied to the piezoelectric device which constitutes the moving mechanism. Afterwards, the theoretical investigation was repeated, and it would be possible to theoretically clarify the moving principle of the moving mechanism. In this paper , while the theoretical investigation is described, it is also shown on the correspondence with the experiments shown in the previous report.

Key Words : *Micro Actuator , Small Linear Actuator , Hysteresis of Material , Piezoelectric Element , Non-Contacting Drive .*

1. 緒 論

バイオテクノロジー、ナノテクノロジーなど新しい技術に係わる研究が活発に行われている。これらの研究において、アクチュエータのマイクロ化は課題の一つであり、研究開発の重要性が増している。アクチュエータのマイクロ化の研究として、新しい駆動機構や新しい機能性材料の組み合わせによる種々の方式のアクチュエータが取り上げられ、研究・開発が活発に行われている。前に提案したアクチュエータは材料の非線形性を利用したもので、非線形材料を振動させた時に変位のヒステリシス特性により材料の支持端に生ずる力のアンバランスを駆動力としたものである。外部から何らかの手段を用いてアクチュエータを構成する非線形材料を振動させた時に発生する力でアクチュエータは左右に移動する。アクチュエータを駆動・制御する電源ケーブルを不要とする可能性を有する新しい方

法を報告した。しかし、圧電素子に印加する電圧の周波数によりアクチュエータが左右に移動する現象の理論的解明は未解決のままであった。

本報告では、材料の非線形性を用いたアクチュエータの駆動原理を理論的に解明した結果を示す。また、先に報告した実験的結果との対比を示す。最初に、バイモルフ形圧電素子を一樣な荷重を受ける片持ち梁として取り扱うことの妥当性について述べる。次に、発生駆動力について解析と実験との対比を示す。最後に、アクチュエータの左右への移動の解明と移動速度について述べる。

2. アクチュエータの構成と動作原理

図1に動作原理を示す。圧電素子にある周波数の電圧を印加すると圧電素子は振動する。振動変位はヒ

ステリシス特性を示す。圧電素子の周波数に応じて移動体は左右に移動し、一次共振の場合には図面上で左方向に、二次共振の場合には右方向に移動する。

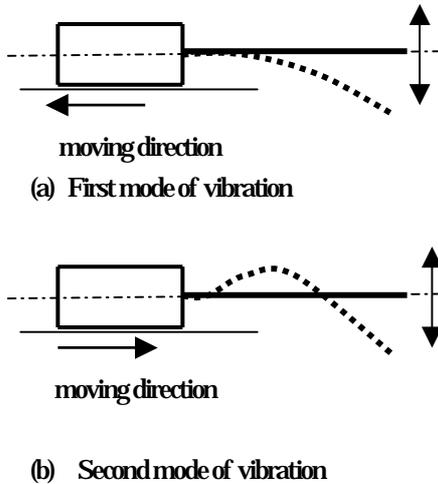


Fig. 1 Driving principle of actuator

3. 移動現象の解析

3.1 解析のための仮定 移動現象の解明のために次のような仮定をした。

バイモルフ形圧電素子の電圧 - 変位における非線形性を図2に示すように直線で近似する。

これらの直線は次式で表される。

駆動電圧に対する圧電素子の変形を一樣な荷重を受ける片持ち梁の変形とする。

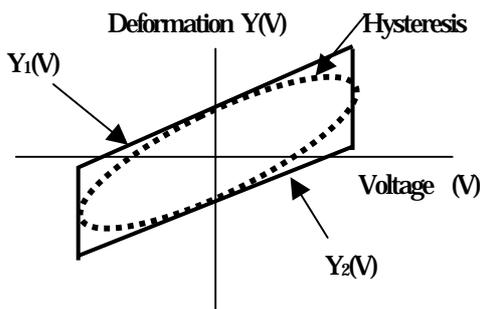


Fig. 2 Nonlinear characteristics of piezoelectric element

3.2 一樣荷重を受ける片持ち梁の振動変位 結晶には、速度に比例する損失（粘弾性損失）がある。圧電素子の振動変位の解析において、粘弾性損失を考慮した方程式を基に解析を進める。図3に示すように片持ち梁の支持端から (a/l) のところに働く周期的な力による (x/l) の箇所の振動変位は次式として表せる⁽¹²⁾。 l は梁の全長である。

$$y\left(\frac{x}{l}, t\right) = \frac{w}{\rho A} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{X_n\left(\frac{a}{l}\right) X_n\left(\frac{x}{l}\right)}{\sqrt{\left(\omega_n^2 - \omega^2\right)^2 + (2C\omega)^2}} e^{i\omega t} \quad (1)$$

ここに、 ρ は圧電素子を構成する材料の密度、 A は圧電素子の断面積である。また、

$$X_n\left(\frac{x}{l}\right) = \frac{1}{\lambda_n} \frac{\cos\left(\lambda_n \frac{x}{l}\right) + \cosh\left(\lambda_n \frac{x}{l}\right)}{\sin\left(\lambda_n \frac{x}{l}\right) + \sinh\left(\lambda_n \frac{x}{l}\right)} \quad (2)$$

$$\omega_n^2 = \frac{\lambda_n^4 EI}{l^4 \rho A} \quad (3)$$

$$2C = \frac{\lambda_n^4 \xi I}{l^4 \rho A} \quad (4)$$

E は young 率、 I は断面 2 次モーメント、 ξ は梁の断面における粘弾性損失係数である。

上式における $X_n(x/l)$ は規準関数と呼ばれ、振動姿態を表し、 λ_n は梁の境界条件による振動方程式の解である。片持ち梁の一端固定、一端自由の境界条件から求まる定数である。 $\lambda_1 = 1.875$ 、 $\lambda_2 = 4.694$ 、 \dots である。

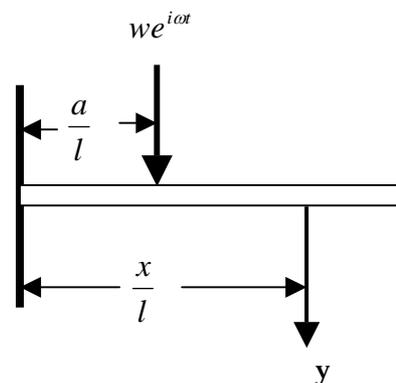


Fig. 3 Vibration of cantilever

w を梁全長に一樣に分布させ、梁の先端における振動変位を求めると次式となる。

$$y(l, t) = \frac{2w}{\rho A} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n} \frac{\cos \lambda_n + \cosh \lambda_n}{\sin \lambda_n + \sinh \lambda_n} \times \frac{X_n(1)}{\sqrt{\left(\omega_n^2 - \omega^2\right)^2 + (2C\omega)^2}} e^{i\omega t} \quad (5)$$

さらに整理すると次式のように表せる．

$$\frac{y(l,t)}{y_{st}} = 16 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^5} \frac{\cos \lambda_n + \cosh \lambda_n}{\sin \lambda_n + \sinh \lambda_n} X_n(1) \times \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2C}{\omega_n}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (6)$$

ここに， y_{st} は静荷重 w を梁に一樣に加えた場合における梁先端のたわみである．

バイモルフ形圧電素子に 60V の電圧を印加し，電圧の周波数を変化させた場合の振動変位の実験結果と式 (6) による理論値との対比を図 4 に示す．実験における振動変位の測定は光学的測定器を用いて行った．図 4 に示すように理論値と実験結果とはほぼ一致している．圧電素子の振動変位を一樣荷重を受ける片持ち梁の振動変位として表すことの妥当性を示している．図中， $f_1 = 2.5 \sim 5.0$ の部分で実験値は一樣の傾向を示している．通常の強制振動では反共振点が見られる部分であるが，圧電素子の場合には反共振とならない結果が得られた．一樣な荷重を受ける片持ち梁でバイモルフ形圧電素子のモデル化を行う場合に，反共振点の近傍では圧電素子の特性とは異なる結果となる．

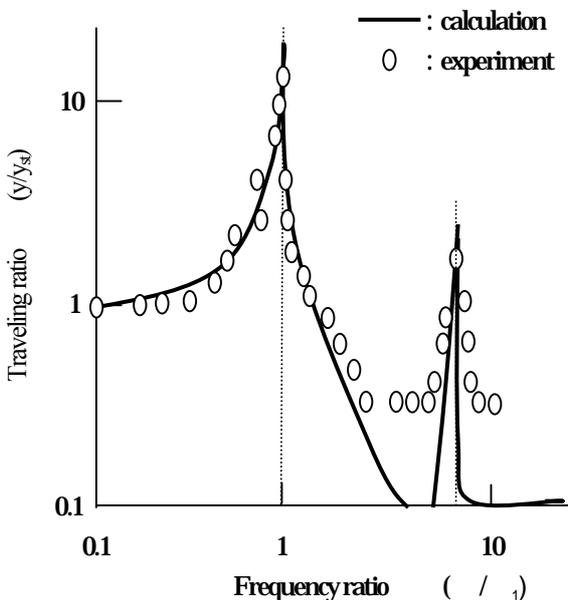


Fig 4 Frequency response of piezoelectric device

3.3 駆動力の算定 図 3 に示したバイモルフ形圧電素子の電圧 - 変位の非線形性を次に示すような直線で近似する．式において， V^* は圧電素子に印加す

る最大電圧で発生する変位 (mm)， a は電圧に対する変位 (mm/V)， b は定数 (mm) である．

$$Y_1(V) = \frac{1}{\delta^*} (aV - b) \quad (7)$$

$$Y_2(V) = \frac{1}{\delta^*} (aV + b) \quad (8)$$

図 5 に示すように片持ち梁の固定端から x の位置の微小部分 dx に働く $wY_i(V)e^{i\omega t}$ の荷重を受けた場合の固定端 (移動体) に働く力は次式のように表せる．

$$F_i(x,V) = wY_i(V)e^{i\omega t} \sin \alpha dx \approx wF_i(V)e^{i\omega t} \alpha dx = wY_i(V)e^{i\omega t} \frac{dy(x)}{dx} dx \quad (9)$$

梁の固定端から先端まで積分することにより働く総力が求められる．

$$F_i(V) = 2 \frac{[wY_i(V)]^2 l^4}{EI} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^5} \frac{\cos \lambda_n + \cosh \lambda_n}{\sin \lambda_n + \sinh \lambda_n} X_n(1) e^{i\omega t} \times \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2C}{\omega_n}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (10)$$

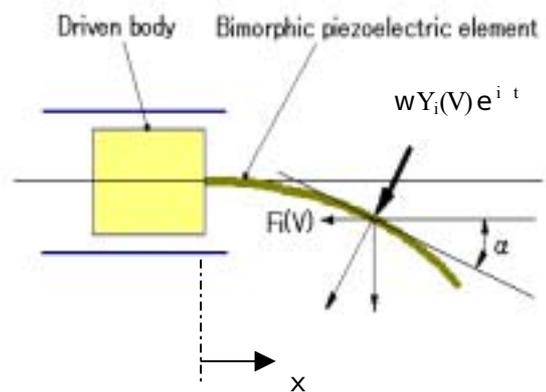


Fig 5 Deformation and force by load $wY_i(V)$

$F_1(V) - F_2(V)$ は圧電素子におけるヒステリシスにより一周期の振動の間に圧電素子が移動体を押す力となる．式(7)，式(8)および式(10)を用いて整理すると次式の関係が得られる．

$$F_1(V) - F_2(V) = \frac{-4w^2l^4}{EI\delta^{*2}} ab \mathcal{V}^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^5} \times \frac{\cos \lambda_n + \cosh \lambda_n}{\sin \lambda_n + \sinh \lambda_n} \frac{X_n(1)e^{i\omega t}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2C}{\omega_n}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (11)$$

ここに、 \mathcal{V}^* は圧電素子に印加される最大電圧である。圧電素子に対する駆動最大電圧における変位と、一様な荷重 w を受ける片持ち梁の先端の変位との関係から w を求める。 w と δ^* との関係は次式となる。

$$w = \frac{8EI}{l^4} \delta^* \quad (12)$$

最終的に、圧電素子のヒステリシスによる力のアンバランスに起因する移動体への駆動力は次式と求まる。この力は圧電素子の振動の一周期間に生ずる力である。振動を繰り返すことにより連続的な力の発生となる。

$$F_1(V) - F_2(V) = \frac{-256EI}{l^4} ab \mathcal{V}^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^5} \times \frac{\cos \lambda_n + \cosh \lambda_n}{\sin \lambda_n + \sinh \lambda_n} \frac{X_n(1)e^{i\omega t}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2C}{\omega_n}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (13)$$

3.4 移動速度の算定 発生力の対比が出来たので、次に発生力による移動体の速度を算定し、実験との対比を行う。図6に結果を示す。実験では、標点距離 10 mm を移動する時間から平均速度を求めた。計算では、エネルギーの関係から次式のようにして速度を求めた。

$$mv^2 = Fx \quad (14)$$

$$v = \sqrt{\frac{Fx}{m}} \quad (15)$$

ここに、 x は移動距離、 m は移動体の質量である。また、 $F = F_1(V) - F_2(V)$ である。

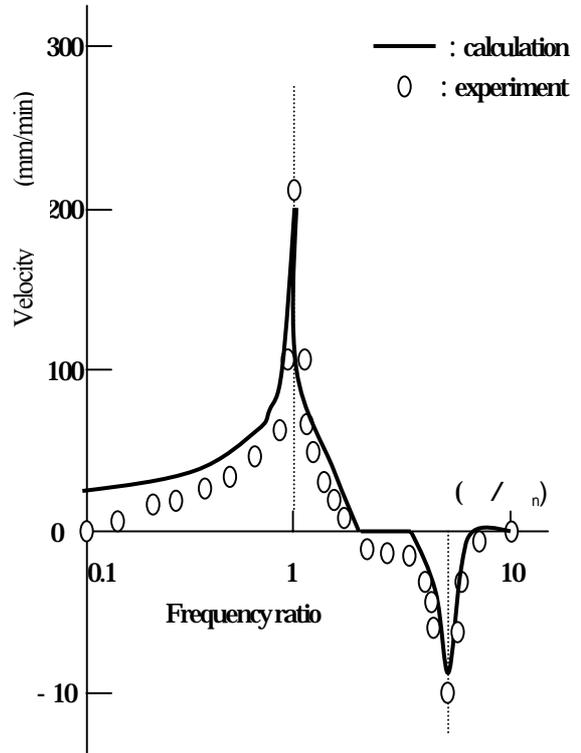


Fig 6 Velocity of calculation and experiment

図に示すように、一次共振に対応して左方向の移動が、二次共振に対応して右方向の移動が得られた。

5. 結言

材料の非線形性を用いたアクチュエータの駆動方法について解析により駆動の可能性を示すとともに実験との対比を行った。圧電素子を一様な荷重を受ける片持ち梁として取り扱い、周波数特性およびアクチュエータにおける駆動力の発生については解析と実験がほぼ一致することを示した。また、正負の駆動力の発生により移動体が周波数により左右の移動が可能であることを明らかにした。しかし、移動体の速度に関する結果は摩擦の存在により実験結果は理論値よりも一桁小さい値となる結果となった。提案した駆動方法をアクチュエータとする場合に摩擦を極力小さくすることが必要である。駆動力を与えるバイモルフ形圧電素子の長さの影響について検討し、圧電素子の全長、すなわち、共振振動数は駆動力の大小に全く影響しないことを明確にした。この結果から、移動機構のマイクロ化を図った場合においても所望の駆動力の発生が期待できる。