

非線形圧電アクチュエータの線形駆動*

江 鐘 偉^{*1}, 長 南 征 二^{*1}
山 本 崇^{*2}, 布 田 良 明^{*3}

Linear Drive of Non-Linear Piezoelectric Actuators

Zhong-Wei JIANG, Seiji CHONAN,
Takashi YAMAMOTO and Yoshiaki FUDA

Piezoelectric ceramics are ferroelectric, and are fundamentally nonlinear in their response to the applied voltage signal, showing a significant hysteretic loop. This paper deals with the linear drive of nonlinear piezoelectric ceramic actuators. It is shown that the expansion of a ceramic actuator can be approximated by a third-order polynomial in the applied voltage. A linear drive method is proposed for the ceramic actuators that compensates for the hysteretic loop, and then a simple nonlinear preamplifier is developed based on the drive method proposed. An experiment is conducted to verify the effectiveness of the amplifier. It is shown that the hysteretic loop disappears when the nonlinear preamplifier is installed between the d. c. amplifier and the input voltage generator.

Key Words: Piezoelectric, Actuator, Linear Drive, Reduction of Hysteresis, Nonlinear Preamplifier

1. 緒 言

近年のメカトロニクス機器や光関連装置の急速な発展にともない、サブミクロン精度での位置決め及びセンシング用素子として、また電磁方式に替わる小型高速応答素子としての圧電体が新しい機能性材料として注目されている。現在、圧電素子としてはセラミックを2枚接着したバイモルフ型とセラミック薄板を積層接着したスタック型セラミック圧電素子、またPVDF(ポリフッ化ビニリデン)に代表される高分子圧電フィルムなどが見られる。これらは力や加速度、熱などによってひずみを与えると電圧を発生(圧電効果)する一方で、逆に電圧を印加するとひずみを生じる性質を有する(逆圧電効果)。これらの性質を利用して近年多くのデバイスが開発されており、今後もその応用範囲が広がると予測される⁽¹⁻²⁾。

圧電アクチュエータの変位量は圧電定数と印加電圧の積に比例するため、一般にアクチュエータ用圧電材料としては圧電定数の大きな材料を採用することが望ましい。しかしながら圧電定数の大きな材料は分極の反転を伴うため、ヒステリシスも大きくなる傾向に

ある。精密位置決め装置や走査型トンネル顕微鏡(STM)に用いられる圧電アクチュエータはできるだけヒステリシスの小さいことが必要であるが、このようなヒステリシスの小さい優れた高感度材料を開発するためには材料自身の特性に限界がある。このため、このような材料特性の不十分性を駆動方法や変位の拡大機構の工夫等でカバーしていくことが実用上必要である。

現在、圧電素子の履歴を除去する駆動及び制御方法としては、オープンループとフィードバックを用いた制御方式がある。フィードバック制御を行う場合は圧電材料の非直線性やひずみ履歴はあまり問題とならないが制御システムが複雑となり、また素子の応答速度にも遅延をもたらす。オープンループ駆動式としてはパルス幅変調方式と分極値制御法がある。パルス幅変調法⁽³⁾は制御工学としては巧妙な手法であるが現実には多くの問題を含んでいる。すなわち高周波数のパルスを使用するため素子の耐久性に問題を生ずること、また大きな履歴を伴いつつ駆動するため素子が発熱し、さらに著しい圧電の時効を生ずる点である。一方、分極値制御法⁽⁴⁾は交番駆動やアクチュエータの絶縁抵抗が非常に大きく圧電素子が純粋なキャパシタンスとみなせる場合は非常に有効であるが、静的あるいは準静的駆動時は投入電荷のアクチュエータ内漏電によって安定した制御ができない。

* 原稿受付 平成6年2月2日。

^{*1} 正員, 東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。^{*2} 東北大学大学院。^{*3} (株) トーキン (〒980 仙台市太白区郡山 6-7-1)。

以上の現状に鑑み、本研究は非線形性を有する圧電素子の力学的な数学モデルをたて、理論と実験の両面から圧電素子の非線形特性を明らかにし、さらに素子の線形駆動のため入力電圧の非線形化公式を求め、得られた結果に基づき入力電圧の非線形変換器を試作、素子の高速・高精度駆動を実現するものである。

2. 圧電材料の非線形特性

図1は積層型圧電セラミックアクチュエータを0～50 Voltで低周波駆動したときの入力電圧とアクチュエータの出力変位の関係を示す。線形入力電圧に対して、圧電アクチュエータの変位には大きなヒステリシスが現れている。積層型圧電アクチュエータは圧電性セラミックの電界誘起ひずみを利用したデバイスで、電極とセラミックが積層された構造を有する。圧電セラミック素子はセラミック微粉末を成形焼結した後分極処理することによって得られる多結晶体であるため、電圧の印加により結晶軸の回転（分域回転と呼ばれる）が生じる。このため、圧電セラミック素子においては大きなひずみが発生し、結晶軸の回転の影響で変位-電圧特性が非線形となり、印加電圧が大きいほどヒステリシスが大きく現れる。特に、正負の電圧が素子に交番に与えられる場合、ある臨界電界以上になると素子の変位-印加電圧曲線は左右対称的なバタフライ形に移行し、エネルギーの損失が非常に大きくなる。このため電気機械変換効率も低下し、さらには大量発熱のため素子の寿命も短くなる。実際に圧電素子をアクチュエータとして使用する場合は印加電圧は0～臨界電圧（正あるいは負）以下に抑えられ、したがって素子の変位-印加電圧特性は一般に図1に示したようになる場合が多い。以上により、本研究は図1に示した特性を有する場合を対象とすることとする。

図2はバイモルフ型圧電素子を片持ちばりのアクチュエータとし、正弦波状電圧を印加したときのばり先端のたわみ変位の周波数応答を示す。図において約9.5Hzのところに変位のピーク値が見られるが、これはばりの1次モードの共振である。また、1次共振周波数の1/2周波数（約6.3Hz）及び1/3周波数（約3.1Hz）においても振幅にピーク値が現れているが、これは2次及び3次の高調波が励起されたものである。

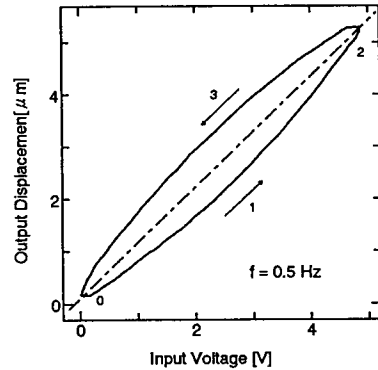


図1 積層型圧電アクチュエータの印加電圧-発生変位特性

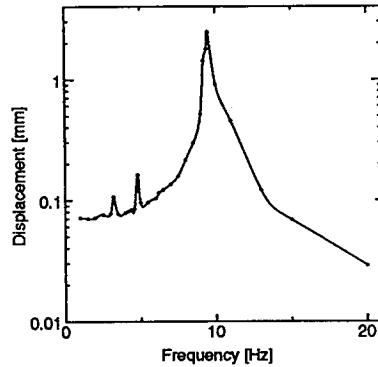


図2 バイモルフ型圧電アクチュエータの周波数応答特性

以上より、準静的な場合について圧電素子アクチュエータの発生変位 $y(t)$ は一般的に印加電圧 $V(t)$ の非線形関数として次のようにモデル化できる。

$$y(t) = a * V(t) + b * V^2(t) + c * V^3(t) \quad (1)$$

ここに、係数 a , b , c はそれぞれの圧電素子アクチュエータに固有の定数であり、実験により確定される。(1)式を用いると、図1及び図2の実験結果は次のように明確に説明される。まず、図1の上下の曲線は各々(1)式で示された3次式で近似できることは明らかである。また図2について言えば、例えば周波数 ω の正弦波電圧

$$V(t) = A \sin \omega t \quad (2)$$

を素子に印加すると素子の発生変位は(1)式より

$$y(t) = aA \sin \omega t + b(A \sin \omega t)^2 + c(A \sin \omega t)^3$$

$$= f \sin \omega t + g \cos 2\omega t + h \sin 3\omega t + \dots \quad (3)$$

となり、本式から分かるように素子に印加する電圧の周波数が ω と単一であるにもかかわらず素子の出力変位には $2\omega, 3\omega$ の成分が現れる。従って、素子に1次の固有振動数の1/2及び1/3の周波数の正弦波電圧を印加すると、素子が1次固有振動数で共振することになる。

3. 圧電アクチュエータの非線形モデル

前述のように、圧電アクチュエータの線形印加電圧 V に対する変位量のヒステリシス曲線は印加電圧 V の3次式を用いて(1)式のように近似される。係数 a, b, c は実測データより最小二乗法で決定される。この場合、昇圧時と降圧時の変位曲線が多少異なるためそれらは別の3次式で近似される。すなわち、昇圧時は

$$\delta = aV_1 + bV_1^2 + cV_1^3 \quad \text{for } V_1 = (0 \Rightarrow V_{1max}) \quad (4)$$

を用い、図1の曲線0-1-2によって係数 a, b, c が決定される。一方、降圧時は

$$\delta = a'V_1 + b'V_1^2 + c'V_1^3 \quad \text{for } V_1 = (V_{1max} \Rightarrow 0) \quad (4')$$

を用い、曲線2-3-1によって係数 a', b', c' が決定される。このような近似方法を用いるとより正確に圧電素子の変位曲線を表せるが、圧電素子の固有定数が6個生じデータ解析の複雑化につながりかねない。そこで以下では、非線形モデルを簡略化するため式(4)と(4)'を一本化することを考える。すなわち、昇圧時は式(4)をそのまま使用し、降圧時は後述のように式(4)を変形させた式を用いて曲線を近似する。

具体的には降圧時の変位と印加電圧の関係を、図3のように昇圧時の曲線を座標変換して与える。始めに

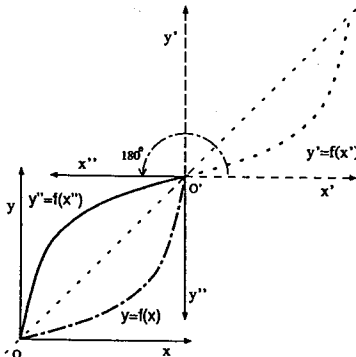


図3 ヒステリシス曲線の座標変換

座標系 oxy に対して(4)式の電圧 V_1 、変位 δ を改めて変数 x, y で表し、図1の0-1-2曲線を図3のように

$$y = f(x) \quad \text{for } x = (0 \Rightarrow x_{max}) \quad (5)$$

$$y_{max} = f(x_{max}) \quad \text{when } x = x_{max}$$

とする。次に関数 $y = f(x)$ を、原点が (x_{max}, y_{max}) にある座標系 $o'x'y'$ へ平行移動する。座標系 oxy と $o'x'y'$ は次の関係を有する。

$$x' = x - x_{max}, \quad y' = y - y_{max}, \quad y' = f(x') \quad (6)$$

最後に座標系 $o'x'y'$ を、原点 o' を中心に逆時計回りに 180° を回転させ、関数 $y' = f(x')$ を座標系 $o''x''y''$ に移動させる。この場合、座標系 $o''x''y''$ は $o'x'y'$ と次の関係を有する。

$$x'' = -x', \quad y'' = -y' \quad (7)$$

$$y'' = f(x'') \quad (8)$$

従って降圧時の変位と電圧の関係に(8)式を用いれば、降圧時は昇圧時の(5)式と同様に表される。以上の座標系を用いると、 oxy 座標系に関する降圧時の変位-電圧曲線は

$$y = y' + y_{max}$$

$$= y_{max} - f(x_{max} - x) \quad \text{for } x = (x_{max} \Rightarrow 0) \quad (9)$$

となり、さらに変数 x, y を印加電圧 V_1 、変位 δ に置き換え(4)式を用いると、降圧時の圧電素子の変位と印加電圧の関係は次式で与えられる。

$$\delta = \delta_{max} - \{a(V_{1max} - V_1) + b(V_{1max} - V_1)^2 + c(V_{1max} - V_1)^3\} \quad \text{for } V_1 = (V_{1max} \Rightarrow 0) \quad (10)$$

4. 圧電アクチュエータの線形駆動法

上述のように、一般に圧電アクチュエータの変位は入力直流電圧に対して非線形性を示す。そこで本研究では以下、入力の線形電圧を非線形変換し得られた非線形電圧で圧電アクチュエータを駆動、素子の非線形出力変位を線形化する駆動方法を考える。具体的には、圧電アクチュエータの変位量を入力電圧 V_1 に対して線形化する新たな電圧 V_2 を電圧 V_1 の関数として昇圧時

$$V_2 = \alpha V_1 + \beta V_1^2 + \gamma V_1^3 \quad (11)$$

$$\text{for } V_1 = (0 \Rightarrow V_{1max})$$

で与える。さらに、入力電圧 V_1 が最大値 V_{1max} となる時の最大出力電圧を V_{2max} として、降圧時は電圧 V_2 を (10) 式と同形の関数で

$$V_2 = V_{2max} - \{\alpha(V_{1max} - V_1) + \beta(V_{1max} - V_1)^2 + \gamma(V_{1max} - V_1)^3\} \quad \text{for } V_1 = (V_{1max} \Rightarrow 0) \quad (12)$$

で与える。

一方、圧電アクチュエータに電圧 V_2 を印加したときの出力変位量を δ_2 とすると、出力変位量は式 (4) より

$$\delta_2 = aV_2 + bV_2^2 + cV_2^3 \quad (13)$$

と表せる。上式に (11) 式を代入し整理することにより以下の式を得る。

$$\begin{aligned} \delta_2 &= a(\alpha V_1 + \beta V_1^2 + \gamma V_1^3) + b(\alpha V_1 + \beta V_1^2 + \gamma V_1^3)^2 \\ &\quad + c(\alpha V_1 + \beta V_1^2 + \gamma V_1^3)^3 \\ &= f_1(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma) V_1 + f_2(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma) V_1^2 \\ &\quad + \dots + f_9(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma) V_1^9 \quad (14) \\ &\text{for } V_1 = (0 \Rightarrow V_{1max}) \end{aligned}$$

同様に降圧時における変位量 δ_2 は

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \delta_{2max} - \{a(V_{2max} - V_2) + b(V_{2max} - V_2)^2 \\ &\quad + c(V_{2max} - V_2)^3\} \\ &= \delta_{2max} - \{f_1(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma)(V_{1max} - V_1) \\ &\quad + f_2(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma)(V_{1max} - V_1)^2 \\ &\quad + \dots + f_9(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma)(V_{1max} - V_1)^9\} \\ &\text{for } V_1 = (V_{1max} \Rightarrow 0) \quad (15) \end{aligned}$$

となる。次に最小二乗法で求めた圧電アクチュエータの固有パラメータ a, b, c の値を用いて、(14) 式と (15) 式内の 2 次以降の多項式がさらに擬似的に 1 次関数で近似できるようゲイン α, β, γ の値を決定する。(14) 式と (15) 式における入力電圧 V_1 の 2 次以降の多項式が 1 次関数で近似できれば圧電アクチュエータの出力変位量 δ_2 は入力電圧 V_1 に対して線形に変化することになる。

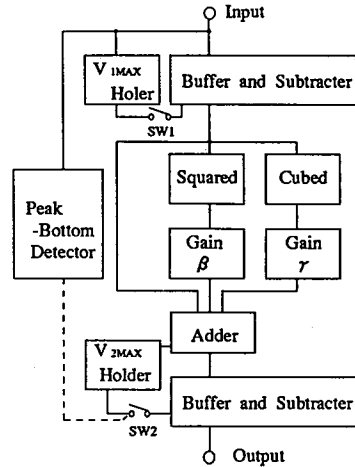


図4 非線形プリアンプのブロック概略図

5. 非線形変換プリアンプ及び実験結果

5.1. 非線形プリアンプ及び実験装置

始めに、(11) 式と (12) 式より入力電圧に対し 3 次の非線形出力電圧を得るプリアンプを試作した。その概略ブロック線図を図 4 に示す。できるだけ簡単かつ汎用にするため、式 (11) の α は 1 と固定し、 β, γ を $-1 < \beta < 1$ $-0.1 < \gamma < 0.1$ の範囲で可変できるようにした。さらに、 V_{1max}, V_{2max} 用ピークホルダーを設け、昇圧時の (11) 式と降圧時の (12) 式が自動的に切り替わるようにした。具体的には、昇圧時は SW1 と SW2 を OFF にし、降圧時はピークボトム検出回路により SW1 と SW2 を同時に ON にすることで昇圧と降圧を自動的に切り替えた。本研究に用いた実験装置の概略を図 5 に示す。図に示すように非線形プリアンプの後に線形直流アンプを置くためプリアンプの入力電圧は任意に設定できるが、ここでは非線形アンプのゲインを決定する際にコンピュータを使用したため、本装置では便宜上プリアンプの入力電圧を 0 ~ 5(V) とした。図においてコンピュータより出力された 0 ~ 5(V) の三角波電圧信号 (直線昇圧・直線降圧信号) は D/A 変換された後まず線形直流アンプで増幅され、駆動電圧として圧電アクチュエータに印加される。これと同時に圧電アクチュエータの変位量をレーザー変位計によって計測し RS232C 経由でコンピュータに記録する。これにより得られたデータに最小二乗法を適用し圧電アクチュエータの固有パラメータ a, b, c を求め、さらに非線形ゲイン β, γ を算出する。次に、求めたゲイン β, γ を非線形プリアンプにセットし、0 ~ 5(V) の三角波入力電圧をプリアンプで非線形変換後線形直流アンプで増幅、圧電アクチュエータに印加する。

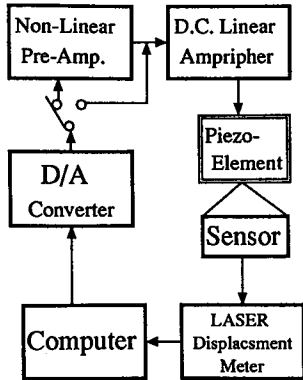


図5 実験装置のセットアップ

5. 2. 非線形プリアンプによる圧電素子の駆動特性

数種類の圧電セラミックアクチュエータを用いて実験を行った。ここで使用した圧電アクチュエータの寸法を表1に示す。

表1 圧電アクチュエータの形状

Piezo-Actuator	Size [mm]
Stacked cell 1	11.4 × 10.8 × 18.0
Stacked cell 2	6.0 × 6.0 × 18.0
Stacked cell 3	6.0 × 6.0 × 9.0
Bimorph cell 1	13.3 × 49.0 × 0.9
Bimorph cell 2	12.0 × 40.5 × 0.7
Bimorph cell 3	10.5 × 33.0 × 0.7

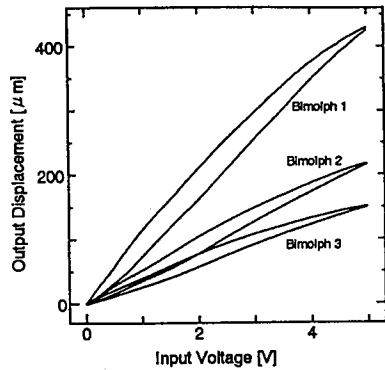


図7 バイモルフ型圧電アクチュエータに三角波電圧を印加した場合の出力変位特性

はじめに表1に示した積層型及びバイモルフ型圧電アクチュエータについてプリアンプ無しの線形印加電圧に対する出力変位のヒステリシス特性を測定した。ここで線形直流アンプのゲインを10倍(20dB), すなわち線形直流アンプの出力電圧を0~50Vとした。得られた測定結果を図6, 7に示す。図6は積層型アクチュエータ, 図7はバイモルフ型アクチュエータの変位応答を示す。図より, いずれのアクチュエータの応答にも大きなヒステリシスが見られる。アクチュエータの寸法の大きいものほど大きな出力変位が得られる反面, ヒステリシスも大きく現われている。また, 図7を図6と比較すると, バイモルフ型アクチュエータは積層型アクチュエータに比べて大きな変位出力が得られるがヒステリシス特性 ($V = V_{max}/2$ における絶対変位差) もそれだけ大きくなっていることがわかる。

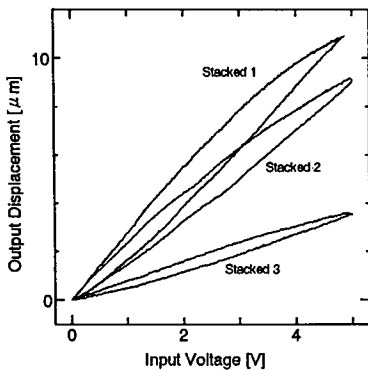


図6 積層型圧電アクチュエータに三角波電圧を印加した場合の出力変位特性

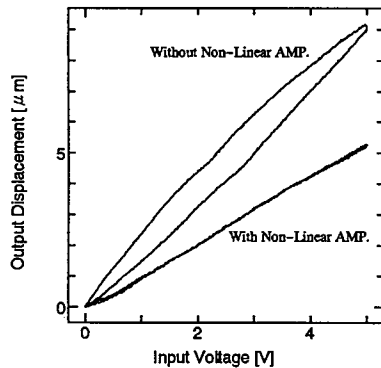


図8 非線形プリアンプによる積層型圧電アクチュエータの入力電圧-出力変位特性

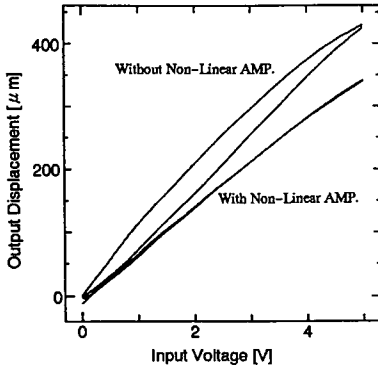


図9 非線形プリアンプによるバイモルフ型圧電アクチュエータの入力電圧-出力変位特性

次に以上得られたヒステリシスが最も大きな「積層1」と「バイモルフ1」を例として、それらの変位応答からアクチュエータの固有パラメータ (a , b , c) を最小二乗法によりそれぞれ (7.88×10^{-4} , 1.17×10^{-4} , -7.37×10^{-6}), (4.10×10^{-2} , 1.01×10^{-2} , -7.27×10^{-4}) と求め、さらに非線形ゲインを「積層1」に対して $\beta = -5.58 \times 10^{-2}$, $\gamma = 1.64 \times 10^{-3}$ 、また「バイモルフ1」に対して $\beta = -4.22 \times 10^{-2}$, $\gamma = 1.67 \times 10^{-3}$ と設定した。これらの β , γ の値を非線形プリアンプにセットし、非線形アンプによる駆動特性を測定した。結果を図8,9に示す。図8は試験片「積層1」に対する実験結果、図9は試験片「バイモルフ1」に対する結果である。線形直流アンプのゲインは10倍(20dB)とした。これらの結果より、非線形プリアンプを用いることで出力変位がほぼ線形化されることがわかる。従って本論文で提案した非線形駆動法は圧電アクチュエータの線形駆動に、簡単かつ有効であることがわかる。以下、本非線形プリアンプの特性についてさらに結果を示す。

[1] 線形直流アンプ増幅率の影響

本論文で提案した非線形プリアンプには入力電圧に対して二乗及び三乗の演算回路が含まれている。そのため入力電圧値はあまり大きくできず、ここでは0~5Vと制限している。しかしながら一般に圧電アクチュエータに印加できる電圧は最大で100Vであり、5Vの入力ではアクチュエータを十分に活用できない。一方、線形直流アンプより圧電アクチュエータに25V, 50V, および100Vまでの電圧を印加した場合に得られた素子のヒステリシス曲線について、それぞれの最適な非線形プリアンプゲイン β , γ を求めたところ各々の値に大きな違いはみられなかった。このことより、非線形プリアンプの出力電圧(0~5V)を増幅度可変型の線形直流アンプにより増幅後、圧電アクチュエータに印

加する方法が有効かどうかについて検討を行う。具体的には、線形直流アンプのゲインが10倍の時(すなわち最大印加電圧が50Vの場合)の非線形プリアンプのゲイン β , γ を用い、線形直流アンプの増幅率のみを変化させた場合の圧電アクチュエータの出力特性の変化を調べてみる。

図10,11は線形直流アンプのゲインをそれぞれ5倍(14dB), 10倍(20dB), 20倍(26dB)と変えて圧電素子の出力変位を測定した結果である。図10は試験片「積層1」に対し非線形ゲインを $\beta = -5.58 \times 10^{-2}$, $\gamma = 1.64 \times 10^{-3}$ と固定した場合、図11は試験片「バイモルフ1」に対し非線形ゲインを $\beta = -4.22 \times 10^{-2}$, $\gamma = 1.67 \times 10^{-3}$ と固定した場合の結果である。図より線形直流アンプのゲインが大きくなるにつれ、圧電アクチュエータの変位が大きくなるにもかかわらずいずれも非線形性やヒステリシスがほぼ抑えられていることがわかる。

以上より、一度非線形プリアンプゲイン β , γ を決定すれば、非線形アンプにより合成された非線形出力電圧をある程度の範囲内で線形増幅しても圧電アクチュエータのヒステリシス特性は十分に抑えられ、線形駆動できることが云える。

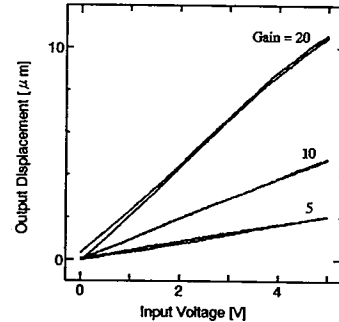


図10 非線形ゲインを固定した場合の線形アンプゲインの変化による「積層1」の入力電圧-出力変位特性の変化

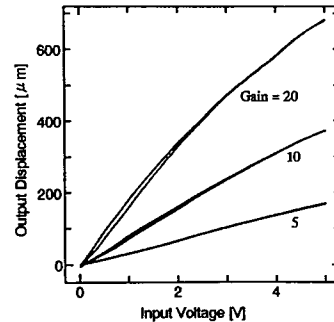


図11 非線形ゲインを固定した場合、線形アンプゲインの変化による「バイモルフ1」の入力電圧-出力変位特性の変化

[2] 圧電アクチュエータ形状の影響

一般に、圧電材料が同じでも、圧電アクチュエータの形状・大きさが異なると出力変位も大きく異なりヒステリシス特性も違ってくる。特に寸法の異なるアクチュエータに対して非線形プリアンプゲインをそれぞれ設定する必要があるとすればプリアンプの量産にも問題をもたらす。そこで、図8,9で求めた「積層1」と「バイモルフ1」の非線形ゲイン β , γ をそれぞれ表1に示した「積層2」、「積層3」及び「バイモルフ2」と「バイモルフ3」に適用し、それらの変位出力を測定してみた。結果を図12,13に示す。いずれも線形直流アンプのゲインは10倍(20dB)としている。これらの結果より、積層型あるいはバイモルフ型アクチュエータの寸法が異なっても同一の β , γ を用い圧電アクチュエータをほぼ線形駆動できることが分かる。一方、積層型とバイモルフ型アクチュエータの同一非線形ゲ

イン β , γ による駆動を試みたが、良好な結果は得られなかった。これは、積層型アクチュエータが印加電圧と同方向の縦効果を利用し、一方バイモルフ型アクチュエータでは印加電圧と垂直方向の横効果を利用するためそれぞれのヒステリシスにかかわる圧電材料特性が異なるためと考えられる。

以上より、一般に非線形ゲイン β , γ は縦変位効果を利用するアクチュエータと横変位効果を利用するアクチュエータでは異なるが、アクチュエータの形状や大きさには影響されないことが云える。

[3] 駆動周波数の影響

圧電アクチュエータは駆動周波数が高くなるにつれて、ヒステリシスも大きくなる。ここでは、非線形プリアンプが駆動周波数に如何に影響するか調べてみることにする。

本非線形プリアンプの設計仕様は入力電圧0~5V, 入力周波数はDC~10Hzと設定されている。ここでは入力電圧の周波数を0.01Hz, 10Hzと変化させ、直接線形直流アンプで増幅し圧電アクチュエータ「バイモ

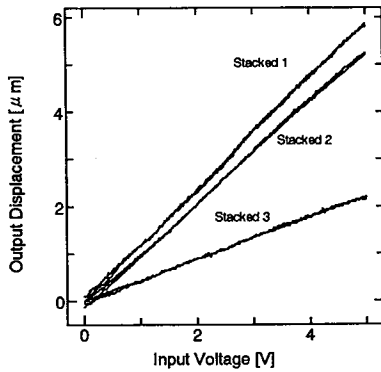


図12 同一非線形ゲイン $\beta = -5.58 \times 10^{-2}$, $\gamma = 1.64 \times 10^{-3}$ による異なる形状の積層型圧電アクチュエータの変位-電圧特性

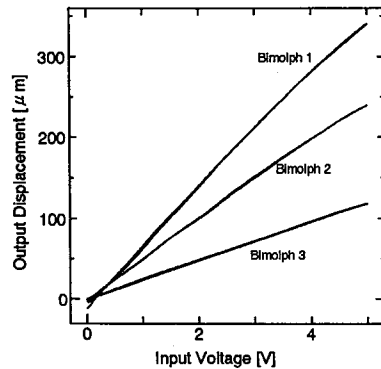


図13 同一非線形ゲイン $\beta = -4.22 \times 10^{-2}$, $\gamma = 1.67 \times 10^{-3}$ による異なる形状のバイモルフ型圧電アクチュエータの変位-電圧特性

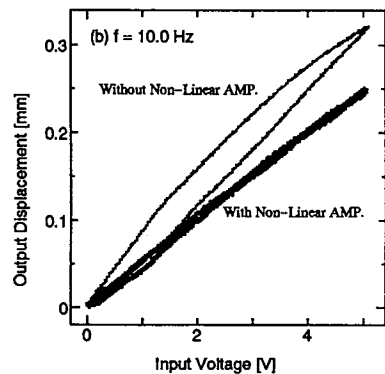
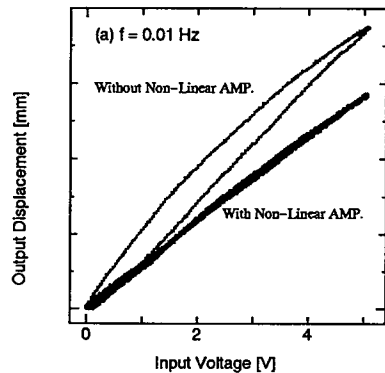


図14 駆動周波数の影響「バイモルフ1」; $\beta = -4.22 \times 10^{-2}$, $\gamma = 1.67 \times 10^{-3}$. (a):0.01Hz (b):10Hz

ルプ1」に印加した場合、及び非線形プリアンプで変換後線形増幅して印加した場合の2例につき実験を行った。なお、使用した線形直流アンプのカットオフ周波数は1kHzである。結果を図14に示す。図よりプリアンプを用いた場合、周波数が増加しても同一のゲインで出力が線形化されることがわかる。

[4] 2次非線形近似による影響

非線形プリアンプ回路がさらに簡略化できれば本アンプをIC化し圧電アクチュエータに内蔵させ、線形出力変位を持つアクチュエータとして駆動制御することが可能である。このため、以下では(11),(12)式において3次の項の係数 γ を零とし、駆動電圧を2次式で近似した場合の線形駆動の可能性につき調べてみる。

図15は $\beta = -4.85 \times 10^{-2}$ としたときの積層型アクチュエータの駆動結果、図16は $\beta = -3.41 \times 10^{-2}$ と

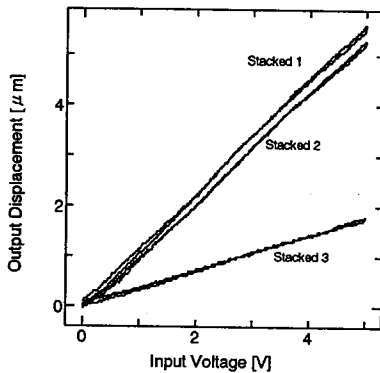


図15 2次近似非線形変換による積層型圧電アクチュエータの入力電圧-出力変位特性; $\beta = -4.85 \times 10^{-2}$, $\gamma = 0$.

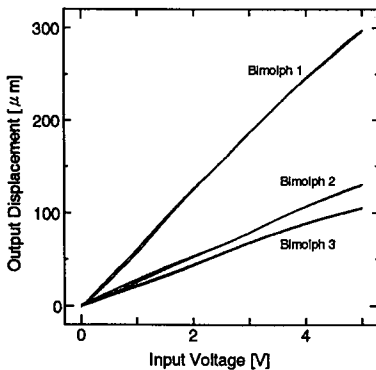


図16 2次近似非線形変換によるバイモルフ型圧電アクチュエータの入力電圧-出力変位特性; $\beta = -3.41 \times 10^{-2}$, $\gamma = 0$.

したときのバイモルフ型アクチュエータの駆動結果を示す。ふたつの係数 β, γ を用い駆動電圧を3次式で与えた図12,13の結果と、 $\gamma = 0$ とし β のみ用いて駆動電圧を2次式で与えた図15,16の結果を比較してみると、3次式を用いた場合の結果がより線形性を有することがわかる。また2次式を用いたときは3次式を用いたときより出力変位が小さくなっている。これは、ゲイン γ による正の補正が入らないために駆動電圧値 V_2 の最大値が小さくなり、結果として最大出力変位が小さくなってしまったためである。しかしながら2次式を用いて合成したときの出力を元来のヒステリシス特性(図6,7)と比べるとはるかに線形性があり、2次の非線形プリアンプも有効であると言える。使用目的に応じて、3次項までの精度を考慮する必要がなければ2次式近似で非線形アンプの回路も縮小でき製作コストも低減される。

6. 結 言

圧電アクチュエータの非線形特性を理論と実験より明らかにし入力電圧の非線形プリアンプを試作、素子の線形駆動を可能にした。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 圧電アクチュエータの出力変位は印加電圧の3次多項式でモデル化できる。各項の係数は圧電アクチュエータの固有パラメータであり、実測した入力電圧-出力変位曲線に最小二乗法を適用することで決定できる。
- (2) 線形入力電圧を本研究で提案した非線形変換式を用いて非線形印加電圧に変換することで、圧電アクチュエータの変位ヒステリシスを改善でき、アクチュエータを線形駆動できる。
- (3) 理論解析に基づき非線形プリアンプを製作し、その有効性を確認した。本アンプの構造は簡単であるためIC化し圧電アクチュエータの内蔵アンプとして使用することが可能である。

なお、本研究は平成4・5年度文部省科学研究費補助金の助成を受けて行われた。

参考文献

- (1) 内野研二：圧電/電歪アクチュエータ、森北出版。
- (2) 一ノ瀬昇：圧電セラミックス新技術、オーム社。
- (3) 池辺, 田中：油圧と空気圧3, 78(1972)。
- (4) C.V.Newcomb and I.Flinn: Electronics Lett 18, 422(1982)。