PZT ペレットの動的微小変位測定と電気特性との関係

酒井武信・河本 洋

(財)ファインセラミックスセンター, 456 名古屋市熱田区六野 2-4-1

Relationship between Electrical Properties and Dynamic Displacement of Piezoelectric Pellets

Takenobu SAKAI and Hiroshi KAWAMOTO

Japan Fine Ceramics Center, 2-4-1, Mutsuno, Atsuta-ku, Nagoya-shi 456

Piezoelectric ceramics such as lead zirconate titanate (PZT) have found wide applications because of their excellent piezoelectric properties. We have developed a dynamic displacement measurement system for PZT pellet with the resolution of $1/100\ \mu\text{m}$, under the conditions which is same one for stack actuator, i.e., several voltage, from 6 to 100 Hz of frequency, from 0 to 27.7 MPa of pre-load. The relationships between electrical and displacement properties were studied and discussed using the domain switching properties which is influenced by voltage and pre-load.

[Received May 19, 1997; Accepted August 7, 1997]

Key-words: Piezoelectric ceramics, Displacement, Domain switching, Actuator

1. 緒 言

チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) を用いたアクチュエーターは、高速応答・低消費電力等の特長があり高度制御システムへの応用が期待されている。特に、ペレット状薄板を複数枚積み重ねた積層アクチュエーターは、高荷重下で大きな仕事量を発生できるように各種の応用研究がされている^{1)~4)}。しかし、荷重の大きさ・駆動電圧・使用温度等の使用条件が異なっているために、変位性能の指標としてこれまで使用している圧電定数 (d_{33}) が、必ずしも実使用条件での変位性能を表していないことが分かってきた。例えば、Zhang らは、荷重の増加に従い d_{33} が減少することを示している⁵⁾。また、Saito は印加電圧の増加に伴い d_{33} は増加するとしている⁶⁾。更には Yamamoto は PZT へ予荷重を印加した状態では分極反転が生じて電気機械結合係数が低下する⁷⁾としている。これまでの新しい PZT 材料の変位性能評価は、実際の積層アクチュエーターを作製してその変位を測定していた。しかし多大な時間と費用を必要とするために効率的な材料開発ができなかった。

そこで最近では、テストピースの変位を測定する技術の検討がされるようになったが、必ずしも積層アクチュエーターの実使用条件で行われてはいない。例えば、Kuriyama らは、 $5 \times 5 \times 20\ \text{mm}$ のテストピースを専用に作製し、荷重を印加していない状態の変位を測定している⁸⁾。また Tani らは $\phi 15$, $t = 0.5\ \text{mm}$ のペレットにおいて $0.1\ \mu\text{m}$ レベルの変位測定を実施しているものの、測定周波数が $0.1\ \text{Hz}$ という低周波に限定されている⁹⁾。

積層アクチュエーターの構成部品であるペレット 1 枚の変位を、積層アクチュエーターと同様の動的条件下において直接測定できるようにすることは、PZT 材料の組成検討を効率的に行えるようになる。そこで、本研究ではまず、ペレット 1 枚での動的微小変位の測定方法について検討した¹⁰⁾。次に、この装置を用いてさまざまな圧電特性を有する PZT ペレットの変位を色々な条件において測定し、従来使用してきた圧電特性との関係を考察した。それにより、特性の優れた PZT 材料を効率的に創製することが可能になると考えている。

2. 実験方法

微小変位測定用の PZT ペレット保持治具及びレーザー変位

計測装置 (laser doppler vibration measurement system) の概念図を図 1 に示す。ペレット保持治具は変形歪みによる共振などから生ずる変位測定誤差をできるだけ抑えるために、剛性の十分高いフレーム構造とした。上下面に Ag ペーストを印刷後分極処理したペレットを、ペレットと直径の等しい金属製の電極端子にはさみ、フレーム上部のネジによりペレットを締め付けて $0 \sim 27.7\ \text{MPa}$ の範囲で予荷重を加えた。予荷重を加えないときは、締め付けネジを用いずペレット上下の金属端子のみとした。金属端子にはリード線を接続し、発振器に接続された電源により駆動電圧を加えた。電源の出力電圧幅は $800\ \text{V}$ 、出力範囲は $-400 \sim 400\ \text{V}$ の AC の零点をオフセットすることにより、片振り電圧を出力することができる。ペレット厚みが $0.5\ \text{mm}$ であるために、この研究ではペレット $1\ \text{mm}$ 当りに印加された電圧として表現すると、電圧幅は $1600\ \text{V}$ 、出力範囲は $-800 \sim 800\ \text{V}$ 、オフセットは $0 \sim 800\ \text{V}$ となる。周波数は、 $6 \sim 150\ \text{Hz}$ の正弦波とした。今回の検討では、オフセットを $800\ \text{V}$ と $400\ \text{V}$ の 2 種類選択した。つまりペレットに印加される電圧は、 $0 \sim 1600\ \text{V}$ と $-200 \sim 1200\ \text{V}$ の種類となる。印加電圧の変化に伴う上部金属端子面の上下位置変化量を変位量とした。ペレット装着治具の平行度を高めかつフレームの剛性を高めることにより圧縮時のペレットへの偏荷重発生を抑制したことと、これらの装置を防振台上に設置し、床のコンクリートが周囲から切断されて島状になったフローティングフロア構造等の工夫により、このレーザー変位装置の分解能は $1/100\ \mu\text{m}$ を確保した。

圧電特性と変位との関係を調査するために、表 1 に示す 7 種類の PZT ペレットのさまざまな条件におけるペレット変位を測定した。ペレット寸法は、直径 $15\ \text{mm}$ 厚さ $0.5\ \text{mm}$ である。径方向の電気機械結合係数 (K_p) と比誘電率 ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$) はペレットにて、インピーダンスアナライザー (HP4194A) を用いた共振反共振法により $1\ \text{kHz}$ にて測定した。4 mm 角、長さ $15\ \text{mm}$ の角柱状テストピースにより縦方向の電気機械結合係数 (K_{33}) を測定した後に、歪みゲージを取り付けてヤング率 (Y_{33}^E) を測定し、(1)式により圧電定数 (d_{33}) を算出した。

$$d_{33} = K_{33} \cdot (\epsilon_{33}^T / Y_{33}^E)^{1/2} \quad (1)^{11)}$$

ペレットの抗電界 (E_c) と残留分極 (P_r) は、ソーヤタ

Fig. 1. Schematic diagram of the displacement measurement system which can change the conditions under various driving conditions, pre-load and driving voltage.

Table 1. Initial Characteristics of PZT Samples for Testing

	A	B	C	D	E	F	G
d_{33} ($\times 10^{-12}\text{m/V}$)	670	659	603	588	524	497	423
k_p (%)	71.0	64.3	66.7	65.1	65.0	65.6	63.2
$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	3700	4420	3590	3600	3200	2620	2250
Q_m	65	61	71	68	65	71	72
T_c ($^{\circ}\text{C}$)	220	134	208	196	244	244	320
E_c (V/mm)	960	650	700	1030	1070	1050	1090
Grain size (μm)	6.8	4.8	2.5	4.0	5.5	3.1	3.7
Bending Strength (MPa)	68.5	53.2	60.0	63.8	64.5	53.1	50.6

ワー回路を用いて測定した D - E ヒステリシス線図より求めた。

今回測定した 7 種類のサンプルは d_{33} が広く分布しており、駆動電圧幅・オフセット・駆動周波数・予荷重が変位性能に与える影響について調べた。

3. 結果と考察

3.1 d_{33} と変位との関係

表 2, 図 2 に予荷重を加えない場合のペレット 1 枚の変位量を示す。ペレットへの印加電圧は、正電圧のみの 0~1600 V 駆動と、負電圧駆動の -400~1200 V の結果を示した。正電圧駆動条件においては、 d_{33} と変位との間には相関性が見られないが、負電圧駆動の場合には比較的相関性が向上した。また、サンプル A, B, C, D のように正電圧駆動に比べて負電圧

駆動のときに変位が著しく増大するサンプルがあった。

K_{33} の測定には角柱テストピースを専用に作製しなければならないが、ペレットの圧電特性と変位性能との間に相関性があれば、材料組成検討にとって効率的である。(1)式の変形を考えると、 Y_{33}^E は一定であるから省略し、真空の誘電率 (ϵ_0) は定数であるから追加することができるとすれば(1)式は(2)式のように変形できる。

$$d_{33} \propto K_{33} \cdot (\epsilon_{33}^T / \epsilon_0)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 K_{33} に変えてペレットにより測定できる径方向の電気機械結合係数 (K_p) を使用した(3)式が成り立つとすれば都合が良い。

$$d_{33} \propto K_p \cdot (\epsilon_{33}^T / \epsilon_0)^{1/2} \quad (3)$$

そこで、表 1 と表 2 より d_{33} と $K_p \cdot (\epsilon_{33}^T / \epsilon_0)^{1/2}$ の関係を表したものが図 3 である。図 3 から分かるように両者には相関

Table 2. The Calculated Value from Electromechanical Coupling Factor (K_p) and Relative Dielectric Constant ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$). Displacement Properties under the Change of Voltage from Plus to Minus

	A	B	C	D	E	F	G
$K_p \cdot (\epsilon_{33}^T/\epsilon_0)^{1/2}$	41.3	42.7	39.5	39.1	36.7	33.5	30.0
Displacement							
	0~1600V	0.60	0.55	0.52	0.52	0.54	0.47
	-400~1200V	0.90	0.82	0.73	0.63	0.65	0.53
increase ratio(%)	23	33	29	20	17	17	12

Fig. 2. Relationship between d_{33} and displacement for samples, A(□, ■), B(◇, ◆), C(△, ▲), D(○, ●), E(○, ●), F(▽, ▼), G(☆, ★).

Fig. 4. Relationship between $K_p \cdot (\epsilon_{33}^T/\epsilon_0)^{1/2}$ and displacement.

Fig. 3. Relationship between d_{33} and $K_p \cdot (\epsilon_{33}^T/\epsilon_0)^{1/2}$.

が高く、 K_{33} の代りに K_p が使用できると言える。したがって、 d_{33} の代用として $K_p \cdot (\epsilon_{33}^T/\epsilon_0)^{1/2}$ を用いることが可能といえる。そこで、図2の負電圧変位と $K_p \cdot (\epsilon_{33}^T/\epsilon_0)^{1/2}$ との関係は図4のようになり図2と同様の相関傾向がみられる。以上の結果より、ペレット変位をペレットの電気特性で表すことが可能と考える。

Fig. 5. The influence of driving voltage on displacement for samples B(◇) and D(○).

3.2 印加電圧の幅と変位との関係

図5にサンプルBとDの、正電圧幅を変化させたときの変位と、圧電定数と電圧 E との積より推察される変位の計算値 ($d_{33} \cdot E$) を示す。 d_{33} の大きいサンプルBでは400 V以上の電圧印加において、計算値を上回った。一方 d_{33} の小さいサン

プルDでは800 Vまでは線形性を示した。圧電材料の非線形性は90度分極反転に起因すると言われているので、サンプルBの変位には比較的低電圧より90度分極反転の成分が寄与してくるといえる。これに対して、サンプルDにおいては、比較的高電圧から90度分極反転の成分が変位に寄与してくるといえる。

サンプルB, D, F, Gにおける電圧オフセット幅に対する変位量の変化を図6に示す。正電圧から負電圧側へオフセットするに従って、変位量は連続的に増加している。

表2で示した、抗電界 E_c と正負電圧印加時の変位の増加率との関係を図7に示す。 E_c が小さいほど変位の増加率が大きいことが分かる。圧電材料に負電圧を印加すると、 E_c 付近で急激に縮み、 E_c で極小となる。したがって E_c の比較的小さい材料に負電圧を印加すると、 E_c 付近での急激な縮みが正電圧変位に加えられるために、変位増加率が大きくなると考えられる。

d_{33} , K_p 等の圧電特性の測定は共振反共振法を用いた数ボルトの交流における測定値である。今回のような数百ボルトの電圧を印加する場合は、分極反転や負電圧オフセットと E_c との関係により、材料ごと測定条件ごとに変位が異なることに注意しなければならない。

Fig. 6. Relationship between driving voltage and displacement of samples, B($\diamond$), D($\circ$), F(∇) and G($\star$).

Fig. 7. Relationship between coercive field (E_c) and the rate of increase for displacement of various samples.

3.3 印加電圧の周波数と変位との関係

図8にサンプルDにおける変位の電圧周波数及び予荷重依存性を示す。予荷重の大きさにかわらず、周波数が6 Hzから150 Hzへ増加するにつれて変位は減少した。予荷重を加えない場合の6 Hzから100 Hzの変位の低下率は40%，予荷重27.7 MPaの場合では30%程度となり、予荷重の大きさにより変位の電圧周波数依存性は異なった。図9には予荷重27.7 MPaの場合の電圧周波数の増加に伴う変位と残留分極 P_r との関係を示した。変位量は残留分極量 P_r と関係が深いことが分かり、電圧周波数の増加に伴う残留分極量の減少により、変位量が減少すると考える。

以上の結果より、ペレット1枚の動的変位量を測定できることを確認した。

3.4 予荷重の変位に及ぼす影響

印加電圧の周波数を10 Hz、印加電圧を-400~1200 Vとしたときの、変位の予荷重依存性を図10に示す。サンプルによって変位低下率の荷重依存性が異なり、その傾向からサンプルDのように、予荷重の増加に伴い変位低下するが、高荷重域では変位を保つもの、サンプルB, F, Gのように、予荷重の増加に伴って変位低下するものの二つのグループに分けられる。

Fig. 8. The influence of frequency on displacement for sample D.

Fig. 9. Relationship between residual polarization (P_r) and displacement of sample D.

Fig. 10. The influence of pre-load on displacement under the driving voltage from -200 to 600 V at 10 Hz.

サンプル D は、今回実験した 7 種類のサンプルの中では d_{33} は中間に位置し予荷重を加えない場合の変位は図 2 から分かるように、他の材料の傾向から突出してはいない。しかし、図 5 におけるサンプル D の変位の非線形性が比較的高電圧より発生することから考えて、変位における分極反転成分の割合が少ないといえる。PZT 材料に予荷重を加えた場合分極反転が生ずることから考えて、サンプル D においてはその影響が小さいために、高荷重域まで変位を保つことができたと考えられる。

従来の研究において変位量は予荷重のほとんど加わらない状態で比較されていた。しかし、今回予荷重を加えた状態での変位量を測定することが可能となった。予荷重を加えない場合には、圧電特性と負電圧印加変位とは、比較的良好な相関が得られたが、予荷重を加えた場合は、分極反転や機械的剛性等も含めた、材料組成の影響も大きくなることが考えられる。例えば、アクセプターを添加した組成においては、変位の荷重依存性が小さくなる例がある¹²⁾。

4. 結 論

数百ボルトの電圧、 $6 \sim 100$ Hz の周波数範囲、予荷重 $0 \sim 27$ MPa という実用域の条件において、ペレット 1 枚の変位量を $1/100 \mu\text{m}$ の精度での測定が可能となった。

予荷重を加えない場合、ペレットへの印加電圧の正負・幅により、種々の PZT 材料同士の変位量の傾向は異なったが、負電圧を用いた変位は、電気特性との相関が比較的良好だった。また、ペレットへの印加電圧の周波数増加に伴う残留分極量の減少により、変位量が減少すると考えられる。

しかし、予荷重を加えた場合の変位量は、ペレットの電気特性だけでは相関づけられず、分極反転や機械的剛性等も含めた材料組成の影響も大きくなると考えられる。

以上の結果より、積層アクチュエーターの構成部品であるペレット 1 枚の変位を、積層アクチュエーターと同様の動的条件において、おおよそ測定できるようになった。

これにより、PZT 材料の組成検討を効率的に行えるようになると考えている。

文 献

- 1) Y. Yokoya, K. Asami, T. Hamajima and N. Nakashima, Toyota Electronic Modulated Suspension (TEMS) System for the 1983 Soarer, SAE Paper 840341 (1984).
- 2) 深見 彰, 矢野正行, 徳田 寛, 黄木正美, 木津龍平, 自動車技術会学術講演会前刷集 (1990) pp. 1373-79.
- 3) A. J. Bell, "Piezoelectric and Electrostrictive Materials for Actuators," Actuator '90 Conference (1990) pp. 150-55.
- 4) T. Sakai, M. Ishikiriya and R. Shimazaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 3051-54 (1992).
- 5) Q. M. Zhang, J. Zhao, K. Uchino and J. Zheng, *J. Mater. Res.*, **12**, 226-34, (1997).
- 6) S. Saito, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, 5313-19 (1995).
- 7) T. Yamamoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, 2256-59 (1991).
- 8) A. Kuriyama, K. Nomura, K. Hirota and T. Ikeda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 3085-89 (1992).
- 9) T. Tani, N. Watanabe, K. Takatori and S. Hori, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 5352-55 (1994).
- 10) 酒井武信, 島崎龍司, 日本セラミックス協会年会講演予稿集 (1993) p. 327.
- 11) 岡崎 清, "セラミック誘電体工学, 第 3 版" 学献社 (1983) p. 325.
- 12) T. Sakai, Y. Terai, M. Ishikiriya, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, 5276-73 (1995).