

モノモルフ・アクチュエータ

坂 笠 長 朝 草 山	井 井 田 倉 部 村	直 裕 博	道 清 也 博 達 博
----------------------------	----------------------------	-------------	----------------------------

Monomorph Actuator

Naomichi SAKAI
Kiyoshi KASAI
Hiroya NAGATA
Hiroshi ASAKURA
Hirotatsu KUSAKABE
Hiroshi YAMAMURA

Bending phenomenon was newly observed in a single ceramic plate of BaTiO_3 or $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ doped with small amounts of SiO_2 and Al_2O_3 or Nb_2O_5 . The bending mode may occur by the presence of potential barrier between silver electrode and ceramic semiconductor as a result of inhomogeneous distribution of an electric field and inhomogeneous polarization in the oxidized surface layer.

1. はじめに

圧電アクチュエータは、ボイスコイル等の従来のアクチュエータと較べて、1) 消費電力が少ない、2) 小型化が可能である、3) 磁場による影響が少ない、等数々の利点を有するため、最近では、ドットプリンタのヘッド、XY テーブルの微小位置決め用素子、圧電リレー等、各方面で活発な研究開発が行なわれている¹⁾

この圧電アクチュエータは、 BaTiO_3 、 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 等の圧電性を有する材料に電界を印加することにより、電界方向に伸び、電界と垂直な方向に縮む性質を利用したものである。通常の強誘電性磁器は、自発分極の向きが等方的に分布した分域 (domain) の集合体から成っており、そのままでは外部に圧電性を示さない。そこで、圧電材料として使用するためには、予め直流高電界を印加して強制的に分極を再配列させる必要がある。これを

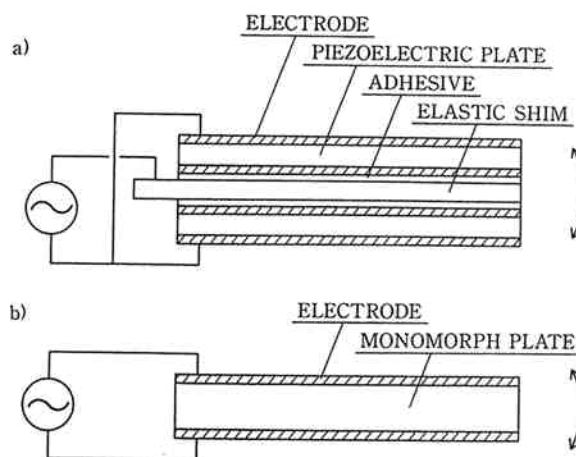


Fig. 1 Bending type actuators.
a) Bimorph.
b) Monomorph.

分極処理という。圧電アクチュエータには、横方向の伸縮を活用したものの代表に、Fig. 1(a) に示すバイモルフ型素子がある。この素子は2枚の分極処理を施した圧電板を弾性シム板を介して接着した構造になっており、電界を印加すると、伸縮特性の違いにより屈曲を生じるものである。それに対して、今回発見されたモノモルフ型素子は、分極処理を施さずとも、セラミックス単板に電界を印加する事により、屈曲を生じるものである。その様子を Fig. 1(b) に示す。この素子はバイモルフ型素子と較べて、1) 接着層が存在しないため、繰り返し耐久性の向上及び変位量ドリフトの改善が見込まれ、さらに2) 分極処理、接着等の工程を必要としないため、製造工程の簡略化が期待できる、等の利点が考えられる。モノモルフについては、圧電性高分子を用いて作成した報告があり²⁾、この場合には厚み方向に熱勾配をつけて分極処理を施し厚み方向に分極率の勾配をもたせている。

セラミックスにおいてモノモルフ型素子が見出された例としては、本報告におけるものが最初である。なお、このモノモルフの開発は、上智大学内野研究室と共同で行なった。

2. モノモルフ型屈曲変位素子

まず最初に屈曲現象について簡単に述べる。Fig. 2(a) に通常の BaTiO_3 の電界変位特性を示す。これは接触型変位計により測定したものであり、通常の圧電体はこのようなバタフライ型の電界変位曲線を示す。また Fig. 2(b) は BaTiO_3 に 5 mol% SiO_2 , 2 mol% Al_2O_3 を添加し 1250°C において15時間焼結を行ったものである。ここで見られる変位量は、通常の圧電セラミックスの厚み方向の伸縮と比較するときわめて大きく、単なる伸縮だけでは解釈できないものであった。そこで、測定用試料として $40 \times 15 \times 0.5$ mm の短冊状の焼結体を使い、非接触の変位計を用いて変位量を測定した結果、セラミックスが屈曲していることを確認した³⁾。以後本報告における測定は、短冊状の試料の固定端から 35 mm の位置を非接触の変位計により測定したものである。

モノモルフ型素子の屈曲原理としては、大別すると、2種類の機構が提案されている。第1のタイプは、 BaTiO_3 , $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 等の圧電性粉末に適量の添加物を加えたセラミックス焼結体に銀電極を焼き付けたもので、電極-セラミックス界面近傍に電界が集中することによって、屈曲を生じるものである。第2のタイプは、厚み方向に抵抗の不均一性をもたせたセラミックス焼結体単板の片側のみ電界を集中させたものであり、これ

は、半導体の表面を酸化すること等により達成できる。以下これら2種類の素子について詳細を述べる。

(1) 不純物添加型モノモルフ素子

セラミックス単板が屈曲を生じるためには、厚み方向

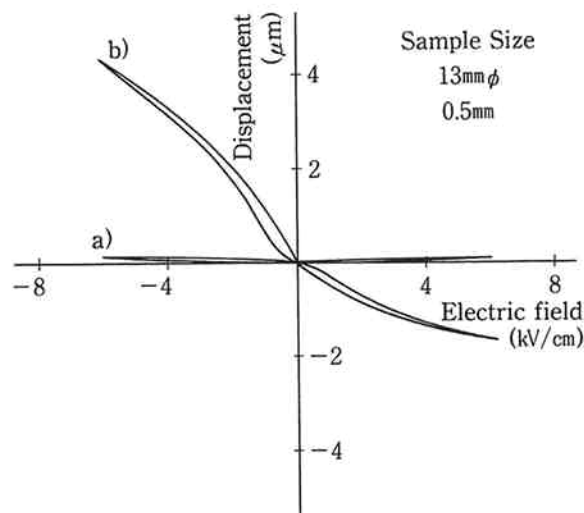


Fig. 2 Displacement versus applied electric field for the sample with Ag electrode. Displacement was measured by contact method using potentiometer.

a) Non-doped BaTiO_3

b) 5 mol% SiO_2 and 2 mol% Al_2O_3 doped BaTiO_3

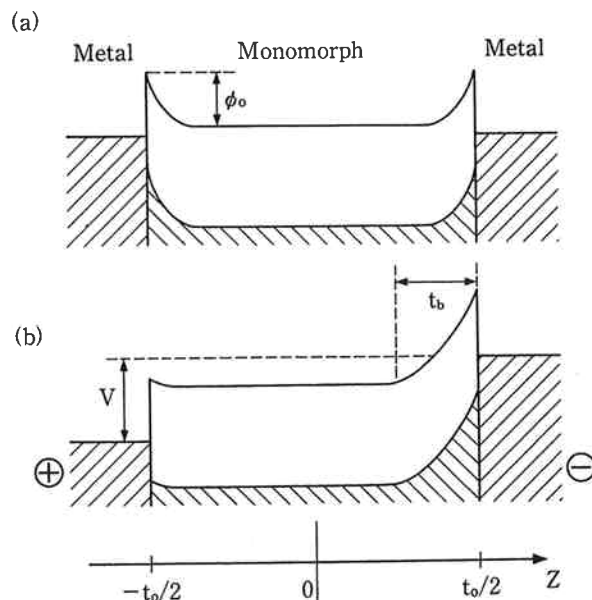


Fig. 3 Energy band structure for an n-type semiconductive ceramic plate with metal electrodes on both the sides.

a) Non-voltage.

b) When an voltage $+V$ is applied on the left-hand-side electrode.

に電界,あるいは分極が不均一に存在する必要があるという仮定と,強誘電性単結晶において,ショットキーバリアーにより電界を電極-セラミックス界面近傍に集中させることができるという報告⁴⁾にもとづき,内野らはモノモルフの屈曲原理を以下のように説明した⁵⁾。

半導体(以下ではn型を例にとる)に金属を接合させると,電子のエネルギーバンド構造にショットキー型(あるいは表面に絶縁層がある場合にはモット型)の障壁が形成されることはよく知られている。Fig. 3(a)には両面に金属電極をもつ厚さ t_0 の半導体磁器のバンドモデルを示す。図中,障壁の高さ ϕ_0 は金属と半導体の仕事関数の差である。この試料の左電極に $+V$ の電圧を印加するとバンド構造は (b) のように変化する。つまり,左右の接合部はそれぞれ順方向,逆方向の電流特性を示す。左右接合部から流入あるいは流出する電流が等しいという条件を考慮して,障壁高さ ϕ_0 が大きい場合には,電界は磁器内で一様にはならずほぼ右の接合部に集中して加わると近似することができる。そして,磁器板の中心を原点にとった座標位置の Z を用いると,電界分布 $E(Z)$ および障壁厚さ t_0 はそれぞれ次式で与えられる。

$$E(Z) = \frac{qN_d}{\epsilon_0\epsilon} \left[Z - \frac{t_0}{2} + t_b \right] \quad (1)$$

$$\left(\text{ただし } \frac{t_0}{2} - t_b < Z < \frac{t_0}{2} \right)$$

$$t_b = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon}{qN_d} (\phi_0 + V) \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここで, q は電子の電荷, N_d はドナー密度, ϵ_0 は真空誘電率, ϵ は半導体の比誘電率である。ここで半導体セラミックスが圧電性も兼ね備えている場合には,非一様な電界分布が屈曲変形を引き起こすことが期待される。幅と比較して十分に長い片端支持の屈曲変位素子(長さ L)の先端変位量 δ と変形の曲率半径 R との間には,

$$\delta = \frac{L^2}{2R} \quad (3)$$

の関係がある。また曲率半径 R は電極の弾性的影響を無視すれば,

$$\frac{1}{R} = \frac{-12}{t_0^3} \int_{\frac{t_0}{2}-t_b}^{\frac{t_0}{2}} d_{31}(Z) E_3(Z) Z dZ \quad (4)$$

と与えられる⁶⁾。ここで d_{31} は圧電定数である。 $d_{31}(Z)$ は局所的な電界分極処理状態に依存するので厳密にはわからないが,ここでは両極端の条件である次の2つの場合を取り上げて考察を進める。

(a) 完全分極状態

$$d_{31}(Z) = d_{31} \quad (\text{一定飽和値}) \quad (5a)$$

(b) 傾斜分極状態

$$d_{31}(Z) = d_{31} \left(Z - \frac{t_0}{2} + t_b \right) / t_b \quad (5b)$$

$$\left(\text{ただし } \frac{t_0}{2} - t_b < Z < \frac{t_0}{2} \right)$$

それぞれの場合に応じて式(4)を計算すると,

$$(a) \quad \frac{1}{R} = -\beta d_{31} \frac{t_b^2(3t_0 - 2t_b)}{t_0^3} \quad (6a)$$

$$(b) \quad \frac{1}{R} = -\beta d_{31} \frac{t_b^2(2t_0 - t_b)}{t_0^3} \quad (6b)$$

を得る。ここでパラメータ β は,

$$\beta = \frac{qN_d}{\epsilon_0\epsilon}$$

として導入した。式(2), (6a), (6b)より β が大きいほど,換言すれば誘電率 ϵ が小さくドナー密度が高い物質ほど屈曲変位は大きくなる。

ここでショットキーバリアー説を実証するために,電極材料の仕事関数を変えて電界変位特性を測定した結果を Fig. 4 に示す。モノモルフ材料としては,5 mol% SiO_2 , 2 mol% Al_2O_3 を添加した BaTiO_3 を 1250°C で15時間焼成したものを用いた。電極材料として a) Ga-In を塗布, b) Au を蒸着, c) Ag ペーストを 750°C で10分間焼き付けたもの,以上3種類について検討した。Ga-In は一般に BaTiO_3 とオーミック接合するといわれており a) < c) < b) の順に仕事関数が増加することより,この順に変位が大きくなると考えられる

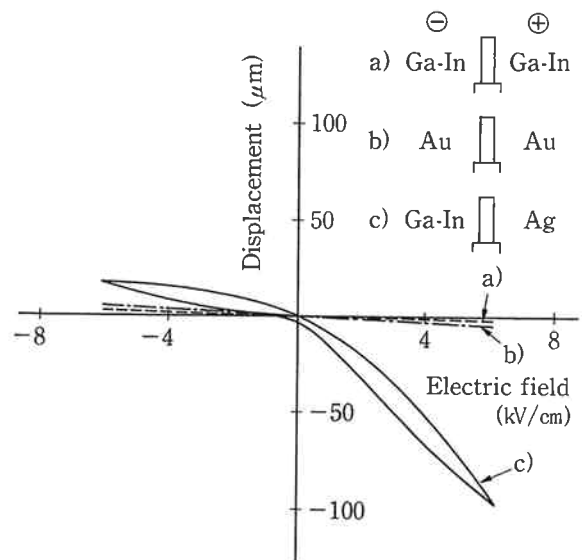


Fig. 4 Electrode dependence of displacement-applied electric field characteristics for the $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ doped BaTiO_3 .

a) Ga-In, Ga-In.

b) Au, Au.

c) Ga-In, Ag.

が、結果は銀電極を焼き付けたものだけに屈曲変位が認められた。この結果から、モノモルフの屈曲現象はショットキーバリエーション説のみで説明できるものではなく、熱処理の効果、電極との反応、空間電荷分極等の影響を検討する必要がある事がわかった。

モノモルフ素子の屈曲が圧電性に由来するものであることを確認するために、基本組成を変えることによりキュリー温度を変化させた材料でモノモルフ型素子を作成し、変位量の温度依存性を調べた⁷⁾。この結果を Fig. 5 に示す。ここでキュリー温度とは、この温度を越えると結晶系が立方晶となり圧電性を示さなくなる温度のことである。Fig. 5 より、変位量はキュリー温度以上ではほぼ消失しており、モノモルフの屈曲は圧電性に由来するものであることが認められる。従って、温度特性を安定させるためには、キュリー温度の高い PZT 系の組成を基本組成として選ぶのが好ましいと考えられる。同一の試料により、電界-変位特性、力-変位特性を調べた結果をそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に示す⁸⁾。

片持ちばり方式のモノモルフ素子の変位量 X 、及び力 F はバイモルフ型素子と同様に次式で表わすことができる。

$$X = \frac{3L^2}{4t^2} d_{31} E \quad (7)$$

$$F = \frac{2wt}{L} d_{31} Y_{11} E \quad (8)$$

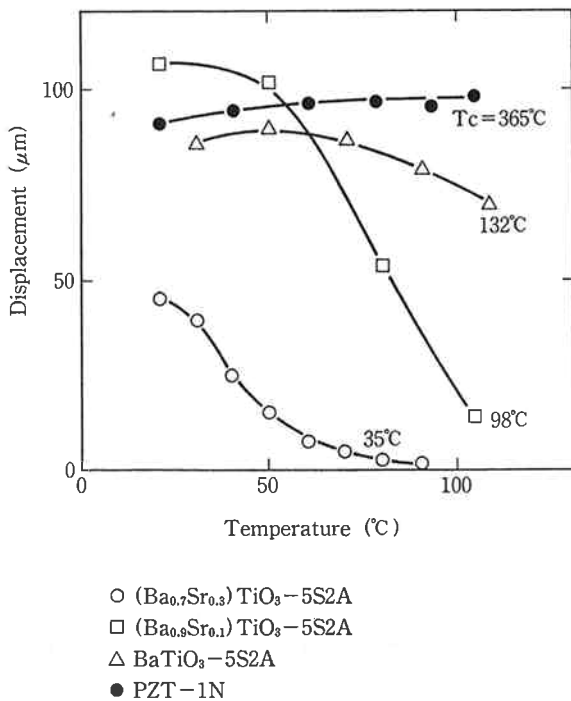


Fig. 5 Displacement versus temperature for various sample.

ここで、 d_{31} は電界と垂直な方向の圧電定数、 E は電界、 $Y_{11} E$ はヤング率、 L は長さ、 t は厚さ、 w は幅を示す。(7)、(8)式は、変位量は電界及び圧電定数に比例し、力は電界、圧電定数、ヤング率に比例するというを示す。Fig. 6, Fig. 7 は、圧電定数及びヤング率が一般的に BaTiO_3 系よりも大きい $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系のものが、変位量・力ともに大きくなっている事を示している。従って、モノモルフ型素子の基本組成を決定する場合、通常の圧電アクチュエータ用素子を作成する時と同様に、キュリー温度が高く、圧電定数が大きく、ヤング率の大きい材料を選択することが必要と考えられる。そして、その材料に単板で屈曲現象を生じさせるために必要

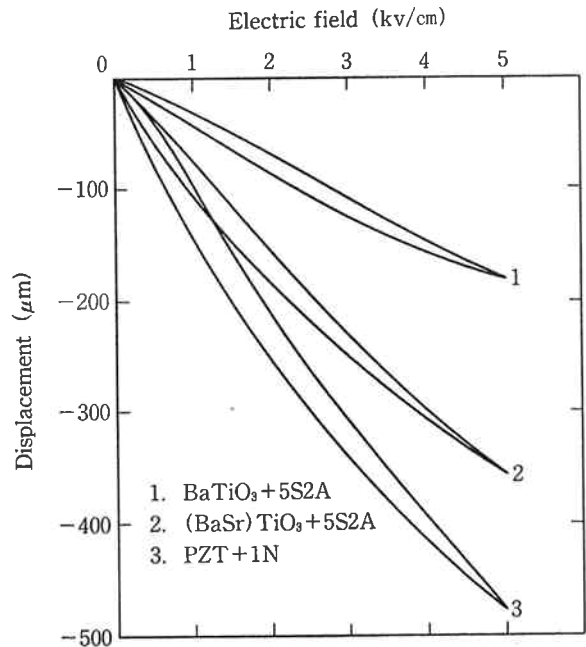


Fig. 6 Displacement versus applied electric field for various sample.

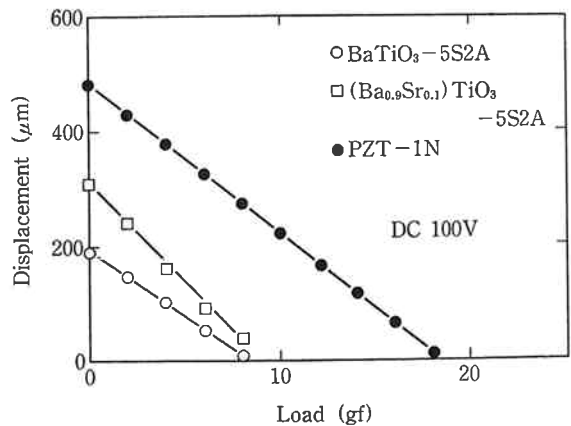


Fig. 7 Displacement versus applied load for various sample.

な添加物を加えることにより、特性の勝れたモノモルフ型素子を得ることができると考えられる。不純物添加の効果については未だ明確ではないが、例えば $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ の場合には、一般に Nb を添加することにより抗電界が低下し分極反転が起こりやすくなる効果がある⁹⁾¹⁰⁾。 BaTiO_3 系の場合には、 SiO_2 , Al_2O_3 を添加することにより半導体化することが知られており¹¹⁾、半導体化により電荷の移動が容易になり、空間電荷がたまりにくくなると考えられる。従って、モノモルフ型素子を作成するために加える添加物は、抗電界及び空間電荷分極を操作する効果があると考えられる。

(2) 表面酸化型モノモルフ

このタイプのモノモルフは 2-(1) で説明した不純物添加型の場合と比べてその屈曲原理が極めて単純である。この場合、厚み方向に抵抗が不均一に分布した状態の素子に電界を加えると、高抵抗層側に電界は集中し、その結果、屈曲が生じるものである。実験的には以下のように半導体の表面を再酸化することによって容易に作成することが可能である。Nb を添加した BaTiO_3 半導体は

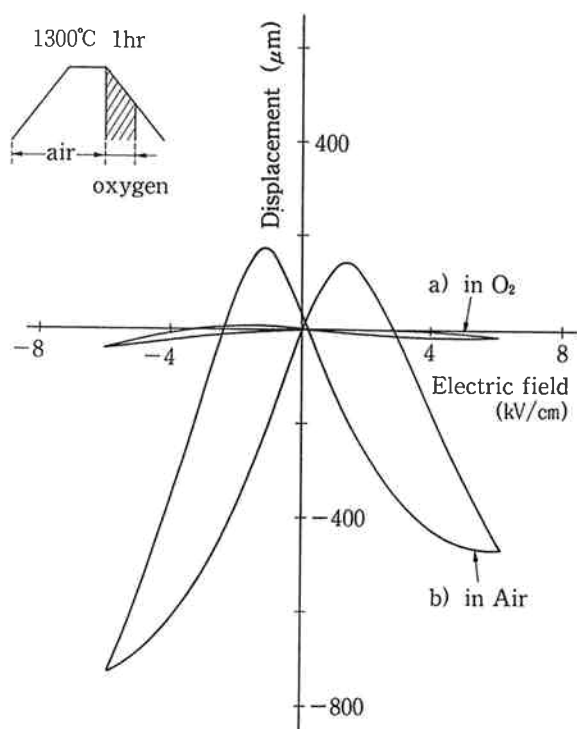


Fig. 8 Displacement versus applied electric field for the sample fired at 1300°C for 1 hr in different atmosphere and cut to the plate of 0.5 mm thickness from the surface.

- a) Fired in Air and then in oxygen gas on final stage.
- b) Fired in Air.

$1000^\circ\text{C}\sim 1350^\circ\text{C}$ の温度範囲で再酸化されることはよく知られている¹²⁾。

0.25 at% Nb を添加した BaTiO_3 を 1300°C で 1 時間焼成し、降温時 $1300^\circ\text{C}\sim 1000^\circ\text{C}$ の温度範囲を一方は a) 酸素気流中、もう一方は b) 大気中と酸化条件を変えて焼結体を作成した。Fig. 8 に焼結体表面から厚さ 0.5 mm の短冊を切り出した試料の電界変位特性を示す。大気中で降温したものは、酸素気流中で降温したものの 10 倍以上の変位を示した。この試料を厚み方向に少しずつ削り、表面からの深さにもなう抵抗の分布状態を調べた結果を Fig. 9 に示す。a) は b) と比べて全体的に高抵抗であり、その結果、電界がほぼ均一に分布するのに対して、b) では電界が表面層近傍に集中したため、多大な屈曲変位を生じたものと考えられる。これをさらに詳しく調べるために電解酸化法を用いて実験を行った¹³⁾。0.1 at% の Nb を添加した BaTiO_3 を 1230°C で 1 時間焼成し、比較的ポーラスな半導体磁器を得た後、これを 5% NaNO_2 含有エチレングリコール溶液中で電解酸化する事により、表面酸化層を形成させる。酸化層の厚さは直流電流値及び印加時間により任意に調整することが可能である。例として 3 mA/cm^2 の電流密度で 1 時間電解酸化した試料の断面写真を Fig. 10 に示す。

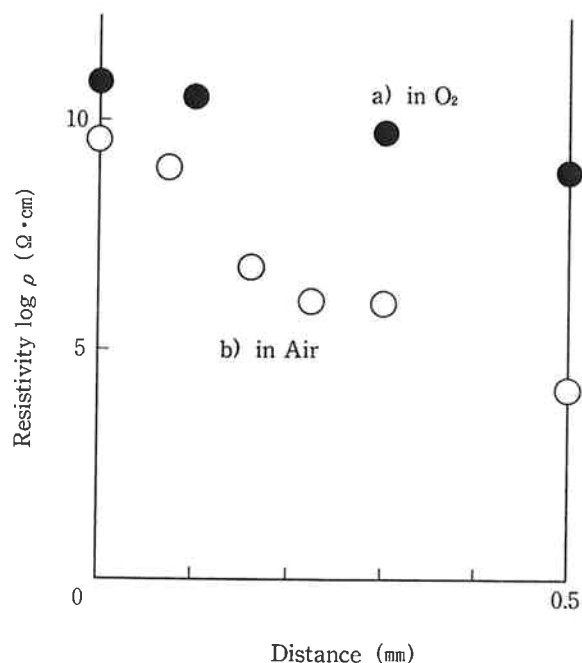


Fig. 9 Resistivity as a function of distance from surface to inside. The resistivity was measured after the oxidized surface was sliced. This procedure was repeatedly done many times.

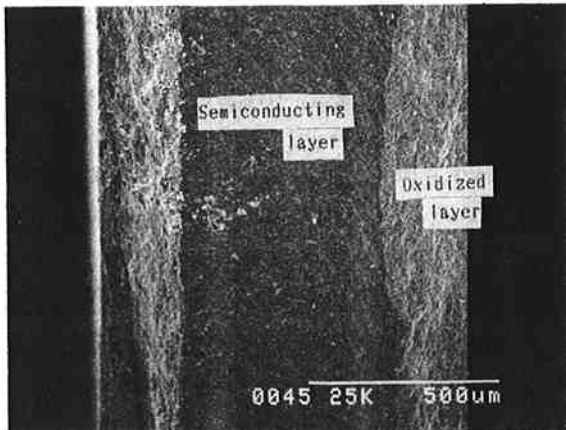


Fig. 10 SEM micrograph of electrolytically oxidized layer, which was oxidized at the current density of 2 mA/cm^2 for 1 hr. The 0.1 at% Nb-doped BaTiO_3 Sintered at 1300°C for 1 hr was used.

電界酸化法により、酸化層と半導体層の比が1:1の時、表面酸化型モノモルフ素子は最大変位量を示した¹⁴⁾。

3. おわりに

モノモルフ型素子は従来にはない、新しく見出された圧電現象を利用する新型素子であるため、実用化に至るまでにはまだいくつかの問題が残されている。例えば、変位量の再現性、経時変化等、諸特性の安定性が十分に得られていない。この理由として、屈曲の原理が十分に

解析されていない事が上げられる。このため、素子を設計する際のポイントとして、今後は、添加物の種類及び量の効果等を中心に検討を進め、屈曲の原理を解明する必要がある。

参考文献

- 1) 内野研二 “圧電/電歪アクチュエータ”, 森北出版 (1986).
- 2) M. M. Marcus; *Ferroelectrics*, **57**, 203-220 (1984).
- 3) 笠井 清ら; “昭和61年度電子材料研究討論会予稿集”.
- 4) H. Motegi; *Journal of the Physical Society of Japan*, **32**, [1], January (1972).
- 5) 内野研二ら; “昭和61年度日本物理学会予稿集”.
- 6) J. K. Lee and M. A. Marcus; *Ferroelectrics* **132**. No. 93 (1981).
- 7) 長田裕也ら; “昭和62年度窯業基礎討論会予稿集”.
- 8) 朝倉 博ら; “昭和62年度窯業基礎討論会予稿集”.
- 9) 岡崎 清; “セラミック誘電体工学”.
- 10) 高橋政雄ら; “エレクトロニクス セラミックス” **3** (1972).
- 11) Y. Matsuo; *Ceramic Bulletin* (1967).
- 12) “チタバリ半導体”, エレセラ出版委員会編.
- 13) 西村陽雄ら; “電子通信学会論文誌”.
- 14) 坂井直道ら; “第3回 US: ジャパンセミナー予稿集”.