

# バイモルフ素子の開発

木 村 信 夫  
 小 池 知 一  
 田 村 芳 夫  
 工 藤 正 行  
 坂 井 直 道

## Development of a Piezoelectric Bimorph Device

Nobuo KIMURA  
 Tomoichi KOIKE  
 Yoshio TAMURA  
 Masayuki KUDOU  
 Naomichi SAKAI

We have developed a piezoelectric bimorph device as an actuator which is expected to have many applications, due to low energy consumption, low electromagnetic noise, and high-speed response. This paper is concerned with the bimorph device which was manufactured using a thick film joining technique, the use of selected materials, and improvement of various characteristics.

### 1. はじめに

圧電アクチュエータは、逆圧電効果を利用して電気エネルギーを応力や変位などの機械エネルギーに換えるための変換器の役割をするもので、レーザー、カメラなど光学機器の超精密化やロボットをはじめとするメカトロニクス関連装置の精密位置決めや VTR などの磁気ヘッドのトラッキング、あるいは冷却用ファン等に広く実用化されようとしている。

電気信号による制御がメカニカルな分野にまで広がっており、ステッピングモーターやソレノイド等が数多く使われているが、これ等はいずれも磁力に頼っており、そのインダクタンスに起因する応答遅延時間が生ずるのは避けられない。また最近の工作機械の加工精度の要求は1ミクロン以下になってきている<sup>1)2)</sup>。一方半導体素子などの集積化が進む中で、その製造工程においてミクロンオーダーの変位量を制御する技術も切望されるように

なってきた<sup>3)</sup>。以上の動向から圧電アクチュエータは次世代のマイクロメカトロニクスの中心を担う機械要素になり得ると期待されている。

従来の電磁駆動アクチュエータはコイルに流す電流値を変えることによってコイルの位置が制御できるもので、この場合の位置決めは100分の1ミクロンまで行なえるが駆動されるコイルがバネで固定されているので発生力はそれほど大きくなく、また応答速度も低く数キロヘルツまでしか追従しないのに比較して誘起される歪を利用した圧電アクチュエータの一般的な特徴は数十ミクロンまでの変位量を100分の1ミクロン程度の精度で制御可能で応答速度は数100キロヘルツまで発生力は1平方センチ当たり400キログラム程度可能である。

現在、圧電アクチュエータを大別すると圧電横効果駆動のバイモルフ素子、当研究室で発見されたモノモルフ素子、また圧電縦効果駆動の積層素子等が存在しており、バイモルフ素子については製造法の各工程の方法やその

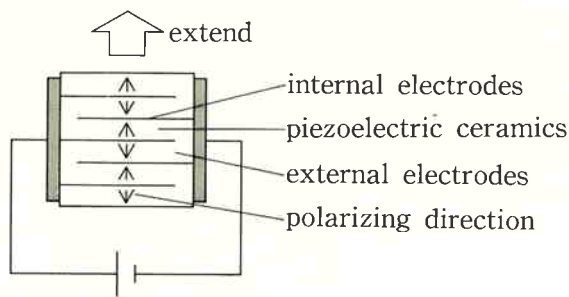


Fig. 1 Structure of a Piezoelectric multimorph.

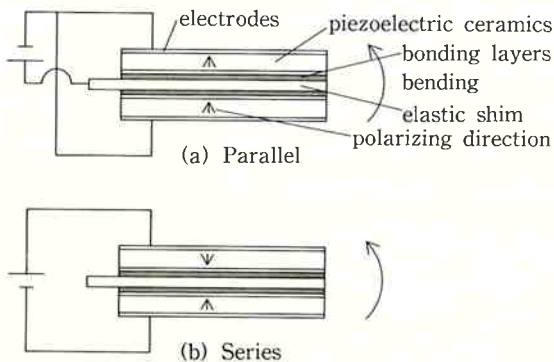


Fig. 2 Structure of a Piezoelectric Bimorph.

条件を確立し、バイモルフ素子の材料を選択し、各種の特性を確認した。また特性向上のための改善を加え、信頼性あるバイモルフ素子を試作し、サンプル出荷段階まで達したのでここに報告する。

## 2. バイモルフ素子の構造と動作原理

Fig. 1 に積層素子の構造を示す。圧電セラミックスの内部に数百マイクロンの間隔で層状の内部電極が埋め込まれており、各内部電極は側面に設けられた外部電極により電気的に並列接続されている。これに外部より電界を印加すると電界方向に伸び縮みする。

これに対して、バイモルフ素子の構造は Fig. 2-(a)(b) に示すように通常両面に電極を有する二枚の圧電セラミック薄板の間にシムと呼ばれる金属箔を挿入して強度をもたせ貼り合わせられたもので、これに電界を印加する。

圧電板に電界印加したとき、電界方向に伸び電界に垂直方向に縮む性質を有している。一方の圧電板が伸び、他方の圧電板が縮み全体として屈曲変位を起こすことになる。すなわち、バイモルフ素子の変位は完全な平行移動は得られず、必然的に回転的な変位となる。Fig. 2-(a) に示したパラレル型と Fig. 2-(b) に示したシリーズ型は構造的に同一であるが分極処理方向が異なってい

る。パラレル型はシリーズ型に比べて、静電容量は4倍に、印加電圧は同じ量の変位を得るのには1/2でよいことになる。

パラレル型の場合の変位量を与える関係式については種々の報告があるが、シムのないバイモルフで片持梁で用いた場合には素子先端の変位量としては、

$$\delta = 3 \cdot d_{31} \frac{l^2}{t^2} \cdot V \quad \dots (1)$$

$\delta$  : 負荷ゼロの時の自由変位

$d_{31}$  : 圧電歪み定数

$l$  : 素子の長さ

$t$  : 素子の厚さ

$V$  : 印加電圧

で与えられる<sup>4)5)</sup>。

次にバイモルフ素子に電圧を印加した時、変位を生じない様にする力を発生力と言い、この力  $F_b$  は次式で与えられる。

$$F_b = \frac{tw}{l} \cdot d_{31} \cdot Y_{11} \cdot V^2 \quad \dots (2)$$

## 3. バイモルフ素子の特徴

積層圧電アクチュエータは変位量は少なく、要求される仕様によっては素子の厚さや印加電圧等を増したり、圧電歪み定数の高い材料を使用することによって変位量を増すことが出来るが現在においては素子高さ 70 m/m で最大60ミクロン程度である。それに対して、バイモルフ素子は大変位量を容易に得ることが出来る。この素子は圧電板の屈曲モードを用いるために、応答周波数や発生力に対しては難点があるが変位拡大率の大きい素子でセラミック板を接着剤で張り合わせるだけという容易な作製法に加えて、小型化が容易である。

また半導体オペレーショナル・アンプなどの大敵で、集積化が問題となる漏洩磁界の心配がなく容量性のため駆動に要する電力は少なく、電磁式の10分の1以下である。

## 4. バイモルフ素子の製造方法

決定したバイモルフ素子の製造方法を Fig. 3 に示し、この手順を簡単に説明する。

まず圧電セラミックスの仮焼粉末に任意のバインダー、可塑剤および溶剤を加え、ボールミルにて十分に分散混合したスラリーを得る。このスラリーをテープキャスト法によって基板上に数十マイクロン～数千マイクロンの厚さのグリーンシートを作成する<sup>6)</sup>。得られたグリーンシートを所望の形状、寸法にカッティングし、

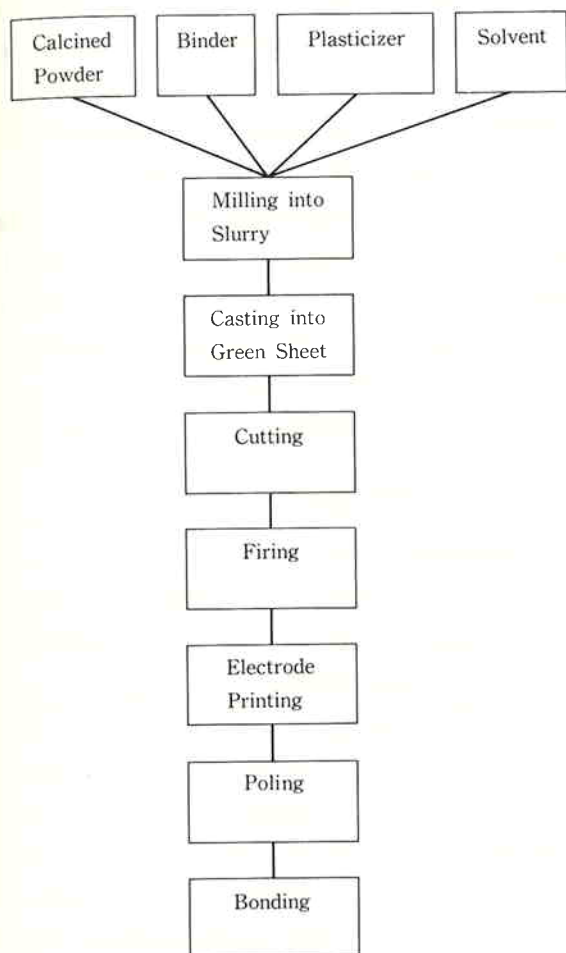


Fig. 3 Flow Sheet of Fabrication Process of the Piezoelectric Bimorph.

1000°C 前後の高温で焼結した後、電極となる金属ペーストを焼付ける。その後分極処理、エージング処理を経て保強のための金属板に2枚の圧電板を接着剤で貼り合わせ素子が製造される。Fig. 2 のように電気的に接続すれば完成する。

〔1〕 圧電材料の選択

バイモルフ素子は圧電材料の特性や厚み、また補強材（シム材）、接着材の種類や厚みそして素子形状等によりその特性が変る。故に材料の選定とともに構造についても重要である。まず第一に要求される特性は変位量で、圧電歪み定数 ( $d_{31}$ ) の大きい材料が必要である。圧電材料特性は基本組成や微量成分によって影響するため固溶範囲の広い  $PbTiO_3-PoZrO_3-Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$  を中心に原子価を考慮した  $Pb^{2+}$  と  $Sr^{2+}$ ,  $Nb^{5+}$  と  $Sb^{5+}$  置換を検討した。通常の焼成法では焼結がそれ程完全ではなく本来の特性が充分出ていないという考えのもとに、いろいろの方法で高密度化<sup>7)</sup> が研究されているが量産化及びコスト高などの問題のため、焼結助剤と焼結条件の

Table 1 Piezoelectric constants of ceramics for the bimorph.

Item	Symbol (Unit)	TBA-11	TBA-12
Relative Dielectric constant	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	4400	2200
Dielectric Loss	$\tan \delta$ (%)	1.4	1.4
Electro Mechanical Coupling Coefficient	$k_{31}$ $k_{33}$	0.35 0.70	0.37 0.71
Piezoelectric Strain Constant	$d_{31}$ ( $\times 10^{-12}$ m/V) $d_{33}$ ( " )	-250 610	-200 450
Voltage Output Coefficient	$g_{31}$ ( $\times 10^{-3}$ V·m/N) $g_{33}$ ( " )	-6.9 14.8	-10.0 23.5
Mechanical Quality Factor	$Q_m$	60	40
Frequency Constants	$N_{31}$ (Hz·m) $N_{33}$ ( " )	1470 1390	1480 1310
Curie Point	$T_c$ (°C)	172	292
Elastic Constant	$Y_{33}$ ( $\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> ) $Y_{11}$ ( " )	5.5 6.9	4.8 7.0
Apparent Density	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	7.8	7.4

検討を実施し、組成の選択を試みた。広い要求特性のため、それぞれの特徴を持った2種類の組成を選ぶことにした。選択した組成の圧電板の特性値を Table 1 に示す。TBA-11 の特徴は圧電歪み定数が大きいため、変位量や発生力の大きい素子が得られる。また TBA-12 の特徴はキューリー点が 292°C と高く、高温での使用が可能である。

〔2〕 シム材の選択

バイモルフ素子に用いられる補強板（シム材）を選択するためにシム材の種類や厚さの変位量に及ぼす影響を調べたが変位量に対する大きい増減は認められなかった。しかし弾性率の異なるシム材の場合、Fig. 4 に示すように素子の抗折力に大きい影響を与えることを確認した。またシム材の前処理としてヘアーライン加工によりクランプ効果が存在し、素子の信頼性の向上に寄与す

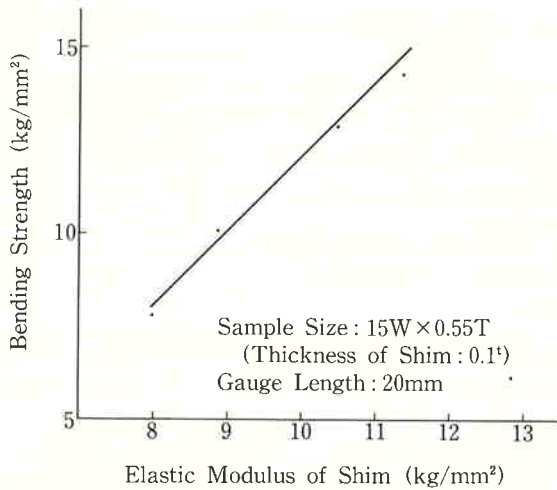


Fig. 4 Relations between Bending Strength and Elastic Modulus of Shim.

Table 2 Relations between Displacement and Hardness of Bonding Layers.

Hardness of Bonding Layer (Order)	Displacement ( $\mu\text{m}$ )
1	410
2	420
3	370
4	370
5	320

Size of the Piezoelectric Bimorph;  
 $30^l \times 16^w \times 0.55^t$

ることが認められた。

〔3〕 接着剤の選択

バイモルフ素子の設計において圧電板の長さ方向の伸び縮みを有効に屈曲変位にいかに変換するかが重要である。Fig. 1 に示したように圧電板とシム板が接着剤で貼り合せられた構造をしているので、接着層が柔らかかったり、厚かったりすると圧電板が伸び縮みしたとき、接着層も同時に変形してしまい屈曲変位に変換する効率が悪くなる。Table 2 に変位量と接着剤の硬さの関係結果を示したが薄くてある程度強度を持った接着剤の場合、境界層での圧電板へのクランプ効果が強く、圧電板の伸び縮みが屈曲に大きく寄与する。

しかし、あまり硬い接着剤だと動荷重の応力集中が接着層に起こり、クラックの原因となり得る。勿論接着剤の剪断強さや接着力も考慮する必要がある。また接着剤の硬化時の収縮により静電容量の低下が認められ、大き

い収縮を持つ接着剤を用いると変位量の減少が認められる。素子に残留応力を持った状態だと温度特性などにも影響が及ぼすことが考えられる。その他、接着剤の選択には耐久性の良好な材質、耐水、耐熱、耐薬品性が優れたもので作業性をも考慮して決定する必要がある。

以上バイモルフ素子の主な材質の選択を述べたが、機能性を持ったバイモルフ素子は特性のバラツキが製造上重要で、Fig. 5 に示したように変位量と静電容量には大きな相関関係を持っており、各工程の静電容量を調べることによって、製造条件を決定することが出来た。特に重要な工程は焼結、電極焼付けおよび接着であった。

5. バイモルフ素子の特性

〔1〕 無負荷時の変位特性

前述したようにバイモルフ素子の特徴はまず大きな変位が得られることである。まず Fig. 6 に AC 60V 時の変位を示すと、外部電界を変化することによってこのようなヒステリシスを画きながら変位を生ずる。変位量は電圧にほぼ比例して増大するが電圧を降下させた場合には上昇時より多少大き目の変位量を示すことがわかる。電界の極性を正負に反転させない場合には小さいヒステリシスとなるがヒステリシス現象を伴うことには変わらない。このヒステリシス現象は強誘電性分極壁の運動と密接な関係があるものと推定され、圧電材料を使用する限りにおいては避けられないものと考えられる。電圧駆動法に対して、最近電荷駆動法が提案されているが<sup>8)</sup>

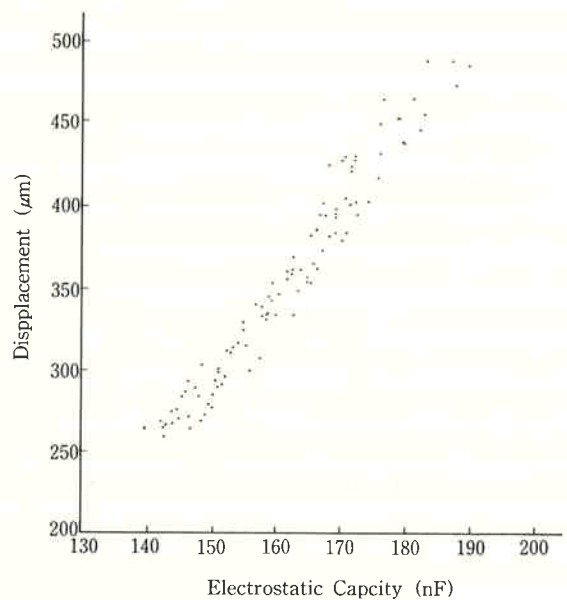


Fig. 5 Correlation between the Displacement and Electrostatic Capacity of piezoelectric bimorph.

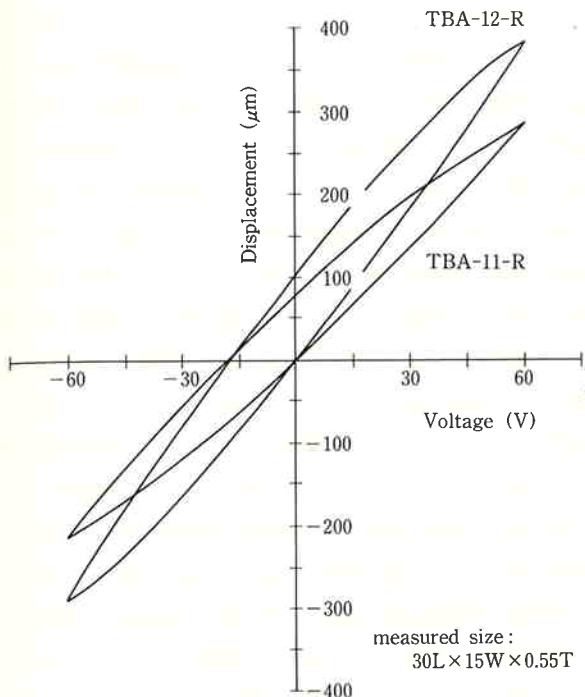


Fig. 6 Hysteresis Loop of the piezoelectric bimorph at 60 Voltage.

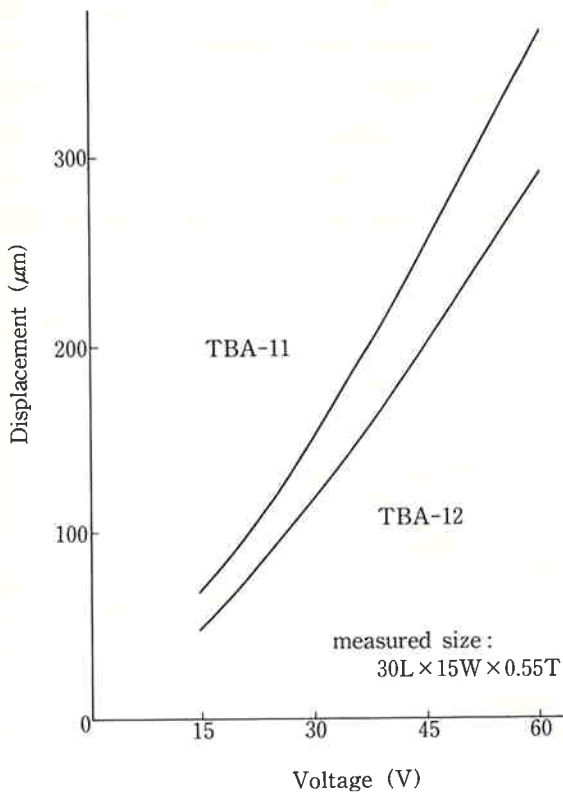


Fig. 7 Relations between Displacement and Voltage.

この残留変位をいかに小さくするかが今後の課題である。  
変位量と電圧の関係を Fig. 7 に示したが変位量は積層素子よりも約30~50倍の大きさとなる。(1)式から計

算した変位量の1.9倍にも達している。この原因として、シム材と接着層の厚みや非線形係数の存在、また(1)式は低電圧駆動の時に成り立つ近似式であるため、かなり高電圧で駆動させる時は大きな差が生じたものと思われる。

(2) 発生力

バイモルフ素子の性能としては変位量と共に発生力の大きさが重要となる。Fig. 8 は選択した2種類の圧電板を用いた素子の変位量と発生力の関係を示すもので、縦軸切片は自由状態の変位量、そして横軸切片は発生力を表わしている。発生力とは素子変位量を完全に拘束した場合を意味し、この直線の傾きは素子の弾性率に対応し、この三角形面積は素子に蓄積される機械エネルギーを意味する。(2)式からも明らかなように弾性率を向上させることは発生力を増し、しいては耐久強さに関係するため素子材料の選択が重要となる。

また電気機械エネルギーの変換効率は素子に蓄積される機械エネルギーと入力される電気エネルギーとの比で示される。この入力された電気エネルギーは全量消費されるものではなく一部素子に蓄積されるものもある。したがってこの電気エネルギーは再利用すれば消費電力はわずかで済むことになる。

また Fig. 9 に素子長さを変化させたときの変位量と発生力の関係を示した。(1)式からも明らかなように変

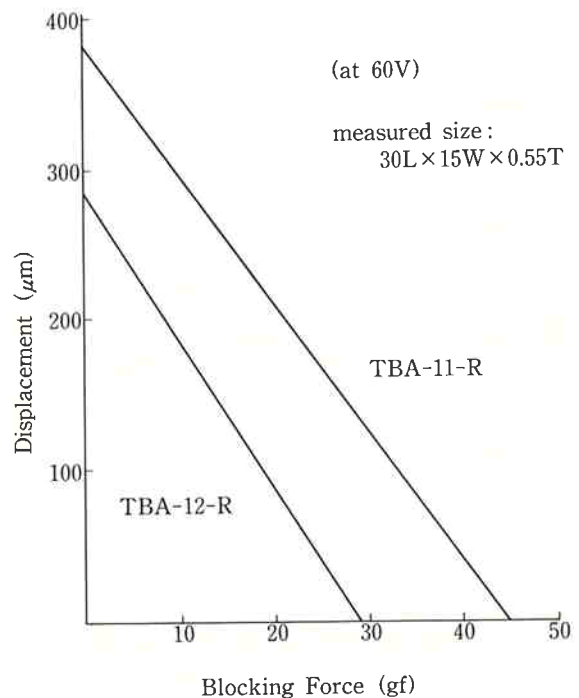


Fig. 8 Relations between Displacement and Blocking Force.



位置は素子長さ  $L$  の 2 乗に比例するが、この結果は 1.75 乗になっている。この原因は非線形効果のため寸法及び形状が変わると若干異なることが明らかとなり、素子設計において考慮する必要がある。

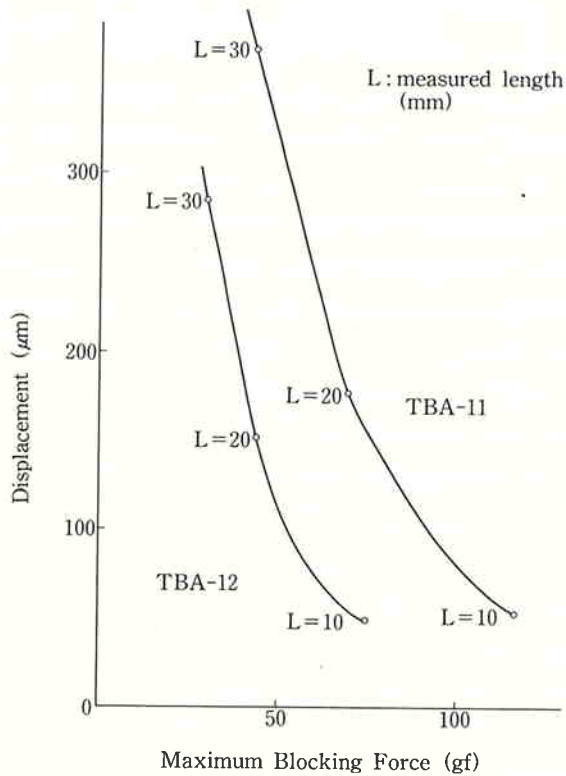


Fig. 9 Relations between Displacement and Blocking Force varied in Lengths of the Piezoelectric Bimorph.

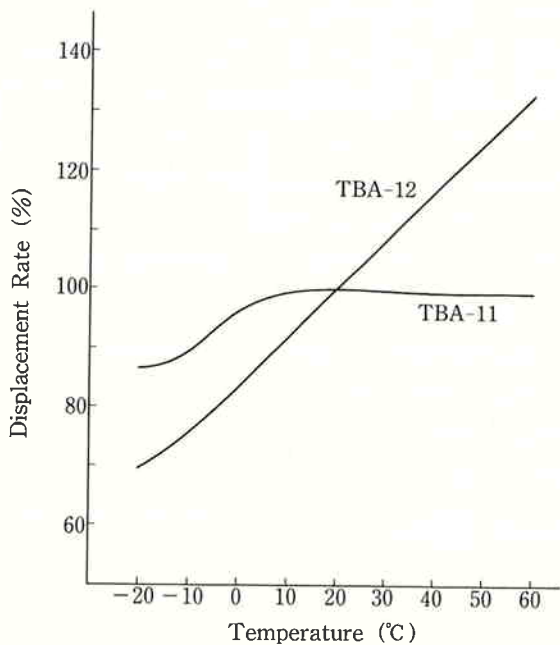


Fig. 10 Relations between Temperature and the rate of Displacement of 20°C at 60 V.

(3) 温度特性

素子の温度特性は実用に当って重要な問題となり得る。一般的に言って OA 機器は 0~60°C 範囲で、産業機器では広く -20~60°C である。この温度範囲で、特性の変化が少ないバイモルフ素子が研究の対象となっており、この補正には熱膨張補正板を貼り合わせたり、バイメタルを使用したり、種々の工夫がなされている。Fig. 10 に測定結果を示した。一般的には TBA-12 のような温度特性を示すが TBA-11 の組成に良好な変位量に対する温度特性があることが確認され、焼付工程の改善によって、この温度範囲内で 20°C の変位量に対して約 20% と低くすることが可能となった。現在もこの改良が検討されており、7% 程度の素子が出ることが確認されている。この原因は素子を構成する材料の熱膨張の影響と残留分極が温度上昇に伴って減少する影響の相互の要因が影響しているものと推定される。その他、Fig. 11 に示すように共振周波数においても温度による変化が存在する。共振周波数の式は、

$$f_r = 0.162 \cdot \frac{t}{l^2} \left( \frac{Y_{11}^E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots (3)$$

$Y_{11}^E$ : 閉回路のヤング率

$\rho$  : 密度

$l$  : 素子長さ

$t$  : 素子の厚さ

で示され、温度変化に伴ってヤング率および密度の変化

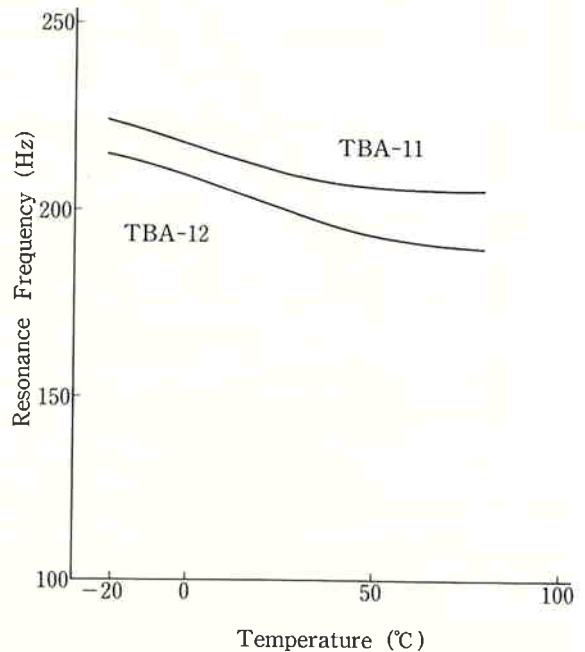


Fig. 11 Relations between Resonant Frequency and Temperature.

が起きていることが原因である。

〔4〕 変位ドリフト

バイモルフ素子に DC 電圧を一定時間印加した時に時間と共に変位が増加する現象を変位ドリフトと呼ぶ。この原因は一般に圧電セラミックスのドメイン分極反転によると云われている。180°ドメインは電圧の極性により短時間で反転するのに対して、90°ドメインは時間と共に徐々に分極されるため、時間と共に変位がドリフトする。Fig. 12 に測定結果を示したが電圧の上昇に伴って変位ドリフトの割合が増加している様子がわかる。この変位ドリフトは負極にすることによって取り除かれる。

〔5〕 耐電圧

実用に対してバイモルフ素子の耐電圧を知っておく必要がある。Fig. 13 に AC 電圧の耐電圧を示した。バイモルフ素子の表面温度はある電圧に達すると急激に上昇する。バイモルフ素子のような圧電方式は電磁方式とは異なり、静的な変位あるいは力を発生させるにさいしては発熱はしない。しかし、パルスや交流信号により連続的に動作させる場合には発熱が起り得る。この発熱原因の大半は誘導的なヒステリシス損失によるものと言われている。従って駆動時間、駆動電圧、繰り返し周波数が増すと素子温度も上昇する。発熱と放熱が低い電圧では飽和の状態であったものがある電圧において発熱量が多くなり得た電圧を耐電圧とした。このことから雰囲気温度が変わると耐電圧も変化することに注意する必要がある。

6. ま と め

バイモルフ素子の特徴および基本特性について述べた

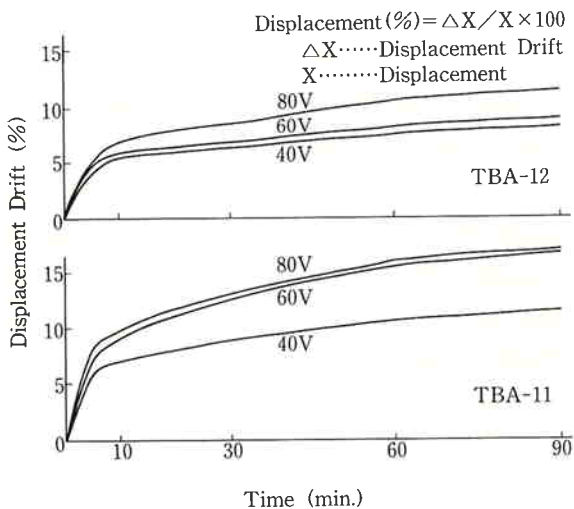


Fig. 12 Relations between Displacement Drift and Time.

が標準仕様を決定する段階まで達し、信頼性ある素子を作製する技術の蓄積を持つことが出来た。

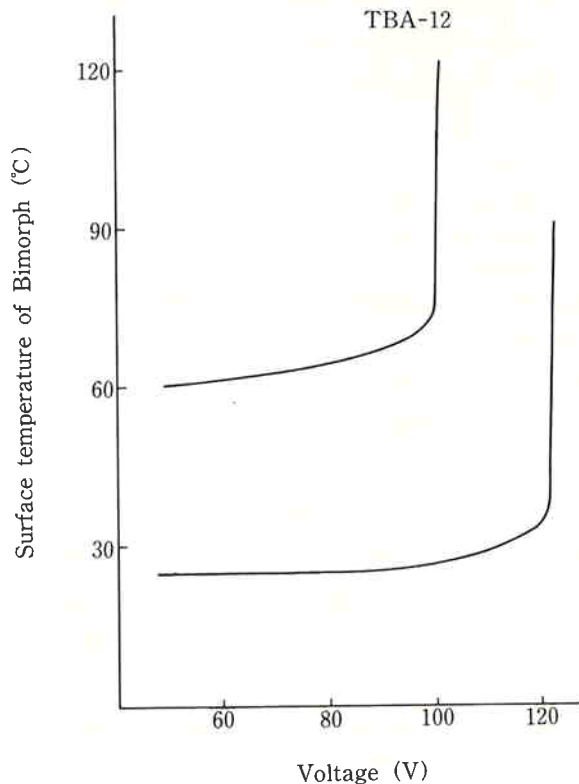
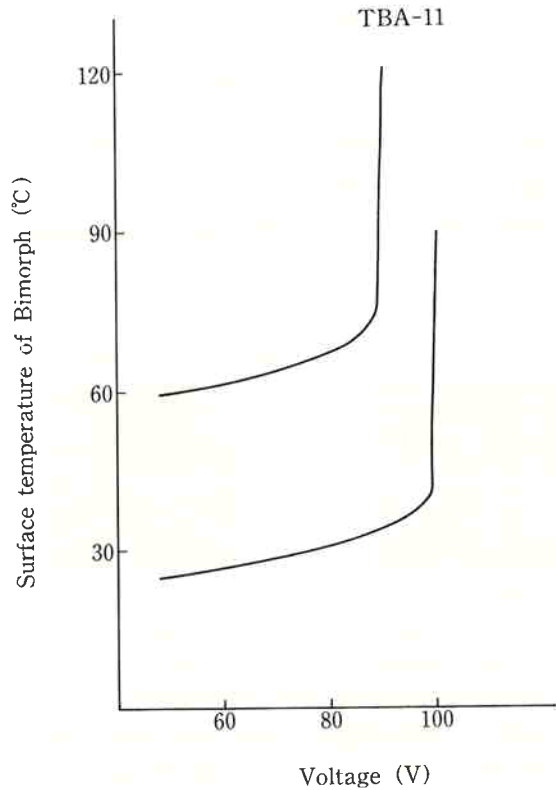


Fig. 13 Relations between Break down Voltage and Surface Temperature of Bimorph.

今後、ユーザーの要求特性も使用の状態によって異なり、ユーザーにマッチした素子へと改良を加えたい。また高機能素子に向けて努力する予定である。

### 文 献

- 1) 野村, 内野; “固体物理”, 17, 467 (1982)
- 2) 稲崎; “センサ技術”, 2, No. 2, 65 (1982)
- 3) 内野; “セラミックス”, 19, No. 11, 933 (1984)
- 4) 永井健三, 近野 正編; “電気機械振動子とその応用”, コロナ社 (1974)
- 5) トリケップス企画部編; “新方式アクチュエータと応用技術”, p. 10
- 6) 加藤; “ファインセラミックス技術”, p. 12 (1983)
- 7) 岡崎; “セラミックス誘電体工学”, p. 233 (1983)
- 8) C. Newcomb and I. Flinn; *Electronics Letter* 18, 93 (1982)



著 者

氏名 木村 信夫  
Nobuo KIMURA  
入社 昭和37年4月1日  
所属 研究本部新材料研究所  
第一研究室  
主任研究員



著 者

氏名 小池 知一  
Tomokazu KOIKE  
入社 昭和62年3月16日  
所属 研究本部新材料研究所  
第一研究室



著 者

氏名 田村 芳夫  
Yoshio TAMURA  
入社 昭和55年3月17日  
所属 研究本部新材料研究所  
第一研究室



著 者

氏名 工藤 正行  
Masayuki KUDOH  
入社 昭和44年3月21日  
所属 研究本部新材料研究所  
第一研究室



著 者

氏名 坂井 直道  
Naomichi SAKAI  
入社 昭和60年4月1日  
所属 研究本部新材料研究所  
第一研究室