

# 圧電ポンプ用バイモルフ素子の開発

長 田 裕 也  
工 藤 正 行  
岡 村 敏 彦  
小 池 知 一  
倉 持 豪 人

## Development of a Piezoelectric Bimorph Element for Piezoelectric Pumps

Hiroya NAGATA  
Masayuki KUDOU  
Toshihiko OKAMURA  
Tomokazu KOIKE  
Hideto KURAMOCHI

We have developed a piezoelectric bimorph element for piezoelectric pumps. The characteristics of the pumps are dependent on the structure of the bimorphs as well as the properties of the piezoelectric materials used. The performance of the pumps can be much improved by a proper combination of selected thickness and properties of piezoelectric ceramics.

### 1. はじめに

圧電セラミックスは、電圧を印加すると伸縮する性質を有する材料である。この性質（逆圧電効果）を、アクチュエータに応用したものを圧電アクチュエータと称しているが、利用する逆圧電効果の方向によって分類すると、横効果による屈曲変位型、縦効果による積層型に大別される。大きな変位量を得ようとする場合、屈曲変位型の圧電アクチュエータが採用されるが、この中にはユニモルフ素子、バイモルフ素子がある。既に、当研究室ではバイモルフ素子の製造について、圧電セラミック材料をはじめ、各構成部材の検討、作製条件の検討を行い、その基本的な製造技術を確立した<sup>1)</sup>。

一方、バイモルフ素子の用途開発については、電子機器の冷却ファン、パーツフィーダ用振動子等、種々の応用を検討してきたが、市場規模の成長が見込まれている

マイクロポンプに注目し、その駆動源としての応用にターゲットを絞った。駆動源に圧電アクチュエータを使用したマイクロポンプは、特に、圧電ポンプ<sup>2)</sup>と呼ばれているが、バイモルフ素子を用いた圧電ポンプ（以降、ポンプと称する。）は、性能面、コスト面から、最も市場に受け入れられている。

Fig. 1 にポンプの構造<sup>2)</sup>を示す。駆動源であるバイモルフ素子はモールド内で振動し、その振動がモールドに伝わりポンプは駆動する。駆動中にモールド内部に発生した熱は容易には外部へ放出されず、バイモルフ素子は非常に過酷な状況にさらされることになる。それ故、バイモルフ素子に求められる信頼性は、より厳しくなり、当研究室で確立した従来の製造技術によるもので得られるポンプの寿命は非常に短いものであった。

筆者らは、ポンプの駆動源として使用可能なバイモルフ素子の製造技術を確立するために、従来の製造工程に

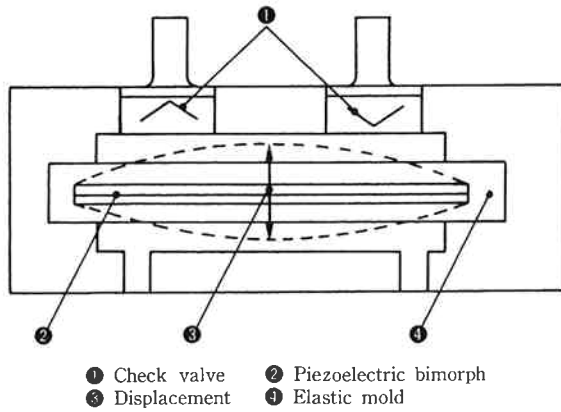


Fig. 1 Structure of piezoelectric pump.

おける要素技術を再度詳細に検討した結果、目的とする信頼性のあるバイモルフ素子を得ることができた。しかしながら、ポンプの用途拡大を図る上で、吐出圧の向上は最重要課題となっており、得られたバイモルフ素子ではその達成は困難であった。そこで、筆者らは、バイモルフ素子性能とポンプ性能の関連性を調べ、製造条件の最適化を行った結果、従来の吐出圧を大きく上回るポンプ用バイモルフ素子を得ることができた。本稿では、高吐出圧化を目指したバイモルフ素子の開発について報告する。

2. バイモルフ素子の構造と性能

Fig. 2 にバイモルフ素子（以降、圧電素子と称する。）の断面構造を示す。基本的には、電極を付与し分極処理を施した2枚の圧電セラミックス（以降、圧電板と称する。）の間に、シムと称する金属板を挟んだ構造であるが、圧電板の分極方向、及び、外部電源との接続方向より、特に平行型と呼ばれているものである。この圧電素子に電圧を印加すると、分極方向に対して垂直方向に一方の圧電板は伸び、他方は縮むため、全体として屈曲変位を示す。この変位を0にするために必要な力を発生力と称している。変位量、発生力は、圧電素子のサイズ、圧電板の圧電定数、印加電圧に依存する<sup>3)4)</sup>。交流電圧を印加することにより、圧電素子は電源周波数に対応して屈曲振動する。

ポンプ性能である吐出圧、吐出流量（以降、流量と称する。）は、圧電素子の変位量、発生力と密接に関係するものと予想され、ポンプの性能向上を図るには、圧電素子の性能向上がポイントであると考えられる。基本型ポンプ用として当研究室で開発した圧電素子（以降、従来品圧電素子と称する。）の形状を Fig. 3 に、素子性能、及び、これを用いたポンプの性能を Table 1 に示す。

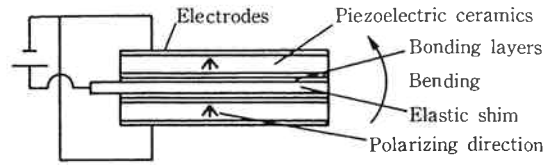


Fig. 2 Structure of piezoelectric bimorph (Parallel type) .

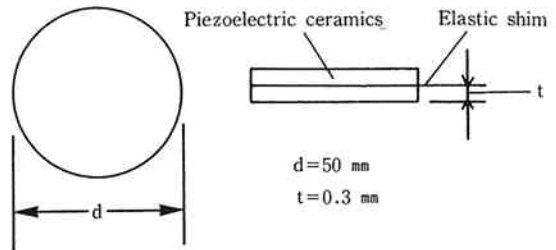


Fig. 3 Schematic diagram of a bimorph for the pump.

Table 1 Characteristics of ordinary bimorph and pump

Ceramics	Thickness	300 μm
Bimorph	Displacement	188 μm
	Maximum blocking force	625 gf
	Current	23.0 mA
Pump	Flow rate	600 ml/min.
	Delivery pressure	0.28 kgf/cm <sup>2</sup>
	Current	22.0 mA

円盤状圧電素子の中央部における発生力、変位量は、各々圧電板のサイズ、圧電定数、及び、印加電圧との間に、短冊型素子における関係<sup>4)</sup>から、次のような比例関係が類推される。

$$\text{発生力} \propto \text{圧電板の厚さ} \times \text{圧電定数} \times \text{印加電圧} \dots\dots (1)$$

$$\text{変位量} \propto (1/\text{圧電板の厚さ})^2 \times \text{圧電定数} \times \text{印加電圧} \dots\dots (2)$$

3. 従来品圧電素子によるポンプ性能の改良

先ず筆者らは、ポンプ性能と圧電素子性能の間には、

以下の関係があるものと予測した。

ポンプの吐出圧 $\propto$ 圧電素子の発生力

ポンプの流量 $\propto$ 圧電素子の変位量

上記の関係と(1)、(2)式より、印加電圧を高くすることはポンプの吐出圧及び流量の向上につながるがわかり、それに基づいて、従来品の圧電素子を交流 200 V (50 Hz) で駆動させた。しかしながら、圧電板に抗電界以上の電圧が印加されたため、圧電板内部の分極が反転し圧電素子は振動しなくなった。

Fig. 1 において、モールド内部に複数枚の圧電素子を組み込むことにより、ポンプの吐出圧は向上することが確認されている。そこで、圧電素子を2枚、モールド内部に組み込んだポンプを作製し、水を媒体に 100 V-50 Hz で駆動させてポンプ性能を調べた。流量については、1分間当たりの水の吐出量の測定を行った。吐出圧については、水を流さない状態でポンプの OUT を塞ぎ、その時 IN にかかる圧力を測定し、これを吐出圧としている。得られたポンプの吐出圧は、0.4 kgf/cm<sup>2</sup> に上昇し、2枚組み込みの効果は確認できたが、発生電流（以降、電流と称する。）は2倍以上となった。通常、空気を媒体とした状態（空運転）での連続運転によるポンプの信頼性試験を行い製品の可否を判定しているが、このポンプを空運転で連続運転したところ、冷却媒体となる水がないこともあり、電流の増大に伴いポンプ内の温度は加速的に上昇し、運転開始後約1時間で圧電素子は破壊した。この時のモールドの表面温度は、150°C に達していた。

以上の結果より、従来品圧電素子によるポンプ性能の向上は困難であることが判明した。

#### 4. 圧電素子性能とポンプ性能の関係

##### (1) 圧電板の厚さと圧電素子、ポンプ性能の関係

前述の検討より、ポンプ内の発熱の抑制がポンプ性能向上にとっての最重要課題であることが判ったが、この発熱の原因は、ポンプ駆動時の電流が大きいことに原因しており、これを圧電素子の側から見れば、圧電板のインピーダンスが低いことに起因していると考えられる。そこで、圧電板を高インピーダンス化することにより、本課題の解決を目指した。

インピーダンスは交流電圧印加時における抵抗に相当するが、圧電板は低損失の誘電体であるので、圧電板のインピーダンスは、その静電容量に反比例する。静電容量は圧電板の厚さに反比例するので、インピーダンスは厚さに比例する。よって、発熱の低減を図るには圧電板を厚くする必要がある。

まず、圧電板の厚さと圧電素子性能、ポンプ性能の関係について調べた。本検討では簡単のため、450  $\mu$ m 以上の厚さのものについては、2枚の圧電板を接合面での導電性を確保できるように貼り合わせ、1枚の圧電板とした。Fig. 4 に、圧電板の厚さを 450~1000  $\mu$ m の範囲で変えた時の圧電素子性能、及び、ポンプ性能の変化を示す。素子性能に関しては(1)、(2)式に従い、厚さが増すにつれて発生力は向上し、変位量は低減した。一方、ポンプ性能においては、吐出圧、流量のいずれも厚さの増加に対して減少することがわかった。

##### (2) 圧電素子の構造、性能とポンプ性能の関係

Fig. 4 を、圧電素子性能とポンプ性能の関係という面から眺めると、素子変位量の低減に伴い流量は減少しており、当初の予測と一致したが、素子発生力の向上に

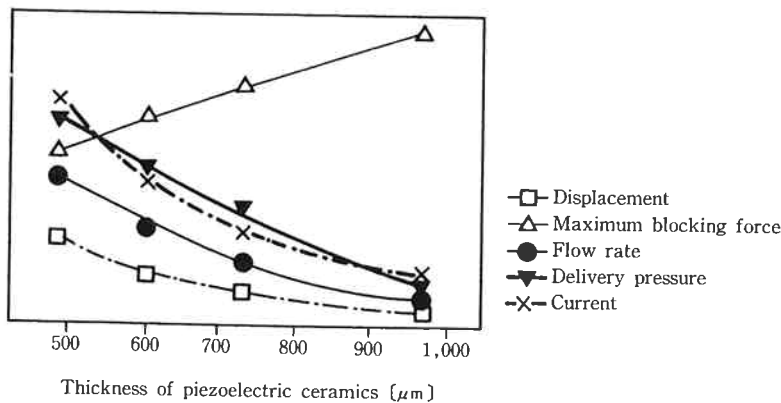


Fig. 4 Relation between the characteristics of bimorph, pump and thickness of the piezoelectric ceramics.

対して吐出圧は減少しており、予測に反する結果となった。このことから、ポンプの吐出圧、流量は、いずれも、圧電素子の変位量のみ依存することが予想され、吐出圧の向上を達成するには、圧電板の厚さを薄くする方向、すなわち、インピーダンスを低下させる方向に圧電素子を設計するという、発熱の低減を念頭においた設計指針とは相反することが判明した。

このような圧電素子性能とポンプ性能の関係を把握するために、流量測定時、及び、吐出圧測定時におけるポンプ内のモールドの変位量を測定した。流量測定時のモールドの変位量は、ポンプの IN、及び、OUT を開放し空運転させた状態で測定した。吐出圧測定時には、実際の測定状態でモールドの挙動を調べた。種々の厚さの圧電素子を用いたポンプを、200 V-50 Hz で駆動させた時の測定結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 において、流量測定時は圧力 0 であるから、縦軸上の測定点は流量測定時のモールドの変位量を示し、もう一方の測定点の縦軸値は吐出圧測定時のモールドの変位量を、横軸値は吐出圧を示す。本測定より、吐出圧測定時においてもモールドは変位しており、その大きさは圧電板（圧電素子）の厚さに依存せず、いずれも 90  $\mu\text{m}$  程度の振幅で振動していた。このことから、圧電素子の発生力は変位量を 0 にするために要する力であり、モールドの変位量は圧電素子の変位量とほぼ等しいことを考慮すると、圧電素子の発生力とポンプの吐出圧は、一義的に関係づけられないことがわかった。

圧電素子性能とポンプの吐出圧の関係を把握するために、圧電素子の変位量と力の関係を Fig. 6 に示す。縦軸上の測定点は変位量測定状態であり、横軸上の測定点は発生力測定状態である。圧電素子の変位量はモールド

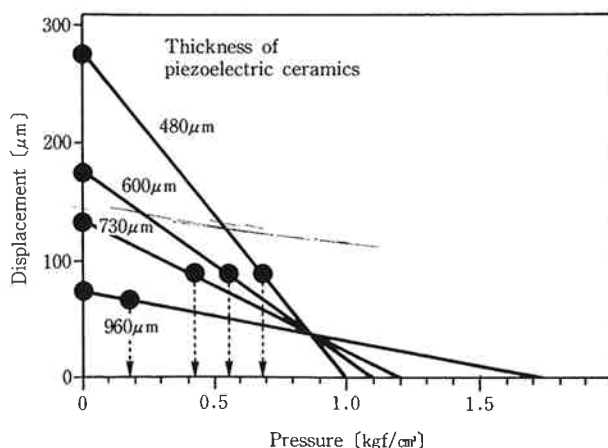


Fig. 5 Relation between the displacement of a mold and pressure of the pump.

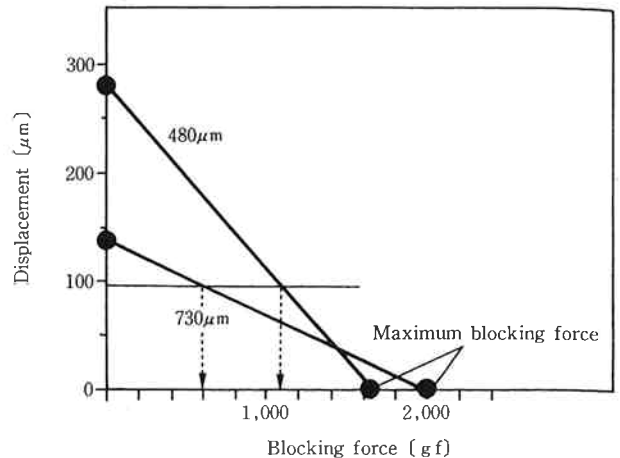


Fig. 6 Relation between displacement and blocking force of the bimorph.

の変位量にほぼ等しいから、吐出圧測定時のモールドの挙動を Fig. 6 に重ね合わせ、変位量 90  $\mu\text{m}$  を通って横軸に平行な直線を引き、各圧電素子の変位量と発生力を結んだ直線との交点を求めると、この交点が、ポンプの吐出圧測定時におけるモールド内の圧電素子の挙動を示すものと考えられ、Fig. 4 の結果を容易に理解することができる。すなわち、交点の横軸の値が、吐出圧測定時における圧電素子の力であり、この値は圧電素子の変位量が大きいのほど、言い換えれば、圧電板が薄いものほど大きくなる。それ故に、圧電素子の発生力の向上に対して、吐出圧は低下することになり、当初の予測と矛盾したことが分かる。

このことから、ポンプ内部の発熱の問題を無視すれば、圧電素子の厚さを薄くするほど、吐出圧はさらに向上することになる。そこで、圧電板の厚さを変数にして圧電素子の変位量、発生力を(1)、(2)式の関係より算出し、Fig. 6 と同様の表現をしたものを Fig. 7 に示す。変位量が増すにつれて、吐出圧測定状態に相当する圧電素子の力は上昇するが、ある変位量を境に、その力は、逆に、減少している。よって、ポンプの吐出圧は圧電板の厚さに依存するが、その値は厚さに対して極大値を示すことが推察される。この予測をもとに、Fig. 4 において、450  $\mu\text{m}$  以下の領域について圧電板の厚さとポンプ吐出圧の関係を調べた結果、厚さ 380  $\mu\text{m}$  において、吐出圧は極大値を示すことが判った。

### (3) 吐出圧と電流の関係

吐出圧の目標値は 0.5  $\text{kgf/cm}^2$  以上であるが、100 V 印加では、吐出圧はその極大で 0.35  $\text{kgf/cm}^2$  であり、目標値を達成することはできなかった。また、市場要求においても、駆動電圧は 100 V から 200 V に移行して

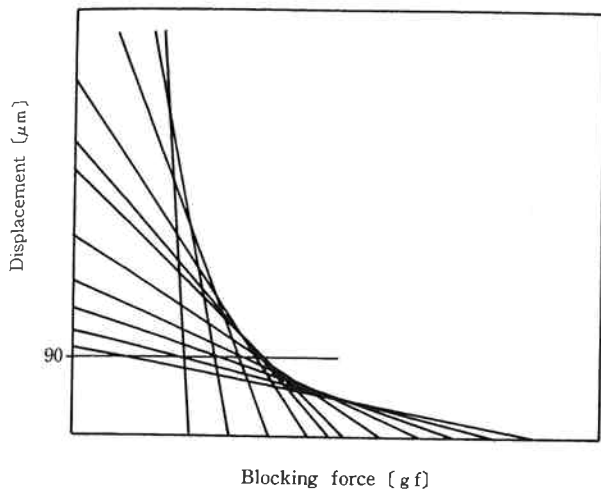


Fig. 7 Simulated relation between the displacement and blocking force varying with thickness of the bimorph.

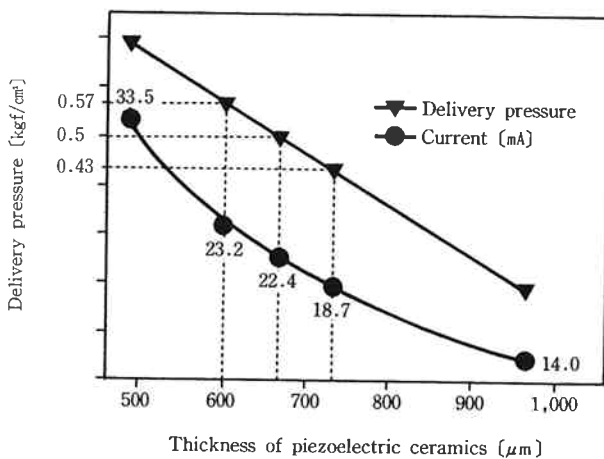


Fig. 8 Relation between the characteristics of a pump and thickness of the piezoelectric ceramics.

いることから、駆動電圧を 200 V に設定した。上記の検討により、圧電板厚さ 380 μm の時に最大の吐出圧が得られることがわかったが、この厚さでは、200 V を印加すると圧電板内部の分極は反転し、圧電素子は振動しなかった。圧電板の抗電界を考慮すると、圧電板の厚さは 450 μm 以上必要である。Fig. 8 に駆動電圧を 200 V とした時の吐出圧、電流と圧電板厚さの関係を示す。0.5 kgf/cm<sup>2</sup> 以上の吐出圧を得るためには、600 μm 以下に設定することになるが、600 μm の場合で、駆動初期における電流は 23 mA 以上であり、空運転での連続運転の結果、発熱し、圧電素子の破壊によりポンプは停止した。そのため、発熱の低減を考慮した場合、600 μm より厚い圧電板を用いなければならないので、

従来品圧電素子の圧電板厚さを調整することによって 0.5 kgf/cm<sup>2</sup> 以上の吐出圧を示すポンプを得ることは、不可能であることが判明した。

### 5. 圧電材料の適正化によるポンプ性能の向上

前述のように、従来品圧電素子によっては、ポンプの吐出圧向上と発熱の抑制を同時に満足することができなかったため、圧電板のインピーダンスを大きくする、すなわち、静電容量を下げる方法として、圧電板の材料(以降、圧電材料と称する。)を誘電率の低いものに変更した。しかしながら、極端に誘電率の低い圧電材料を用いた場合、圧電素子の変位量、発生力は、いずれも、従来品に比べ大きく低下した。圧電素子の性能は、(1)、(2)式より圧電材料の圧電定数に比例するが、この圧電定数は、誘電率、及び、電気機械結合係数に比例する。よって、発熱に寄与する誘電率に関しては、圧電素子の性能を損ねないように、従来品に比べ若干下回る程度であり、かつ、電気機械結合係数は大きな圧電材料である TBA-20 を用いた。Table 2 に、TBA-20 の圧電特性

Table 2 Properties of various piezoelectric materials

Material	TBA-11	TBA-20
Relative dielectric constant $\epsilon_{33}/\epsilon_0$ [-]	4700	4100
Dielectric loss $\tan \delta$ [%]	2.7	2.5
Coupling factor $k_p$ [-]	0.57	0.61
Mechanical quality factor $Q_m$ [-]	50	50
Curie point $T_c$ [°C]	160	165

Table 3 Characteristics of bimorphs from different piezoelectric materials

Piezoelectric material	TBA-11	TBA-20	
Thickness of ceramics [μm]	600	600	560
Capacitance [nF]	210	180	215
Dielectric loss [%]	2.1	2.1	2.2
Displacement [μm]	150	137	161
Maximum blocking force [gf]	1900	1880	1800
Current [mA]	24.6	18.0	21.0

を、従来品である TBA-11 と比較して示す。

TBA-20 を用いて作製した圧電素子の諸特性を、Table 3 に示す。Fig. 8 を参考にして、圧電板の厚さを 600  $\mu\text{m}$  近傍に設定したが、560  $\mu\text{m}$  の時に得られた圧電素子を用いたポンプは、目標である 0.5  $\text{kgf/cm}^2$  を大きく上回り、0.62  $\text{kgf/cm}^2$  の吐出圧（流量：570  $\text{ml/min.}$ ）を示した。このポンプにおける電流は 20 mA 以下であり、空運転状態においても顕著な発熱は認められず、製品スペックである120日間の連続運転においても、圧電素子の破壊は生じなかった。

## 6. ま と め

ポンプと圧電素子の性能の関係を、圧電素子の構造と

材料の両面から検討し、それらを最適化することによって、従来にない高い吐出圧を示すポンプ用圧電素子を得ることができた。

## 文 献

- 1) 木村信夫ら；“東ソー研究報告”、Vol. 32, No. 2, 141 (1988).
- 2) 佐藤壮征；“エレクトロニク・セラミクス”、22, 65 (1991).
- 3) 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).
- 4) 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.



著 者

氏名 長 田 裕 也  
Hiroya NAGATA  
入社 昭和61年4月1日  
配属 研究本部  
筑波研究所  
セラミックス開発室  
副主任研究員



著 者

氏名 工 藤 正 行  
Masayuki KUDOU  
入社 昭和44年3月21日  
配属 研究本部  
筑波研究所  
セラミックス開発室  
副主任研究員



著 者

氏名 岡 村 敏 彦  
Toshihiko OKAMURA  
入社 昭和63年4月1日  
所属 研究本部  
筑波研究所  
セラミックス開発室



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  
筑波研究所  
セラミックス開発室



著 者

氏名 倉 持 豪 人  
Hideto KURAMOCHI  
入社 平成4年4月1日  
所属 研究本部  
筑波研究所  
セラミックス開発室