テーラーメイド型積層圧電アクチュエータの支持部解析と評価*

当田 直哉^{*1}, 中島 正博^{*2}
新井 史人^{*3}, 福田 敏男^{*4}Analysis and Evaluation of Support for Tailor-Made
Multilayer Piezoelectric ActuatorNaoya TODA, Masahiro NAKAJIMA^{*5},
Fumihito ARAI and Toshio FUKUDA^{*5} Department of Micro-Nano Systems Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

We have been proposed the tailor-made multilayer piezoelectric actuator (TAMPA) with large displacement and large force. TAMPA has the layered structure of two bimorph-type piezoelectric elements combined by both ends supported. Therefore, the performance of TAMPA is affected by the shape and the stiffness of support. It is necessary to design the optimum structure of support of TAMPA. This paper proposes four-point supported structure because of the plate shape of bimorph-type piezoelectric elements. The effect of the shape of supports is estimated through finite element analysis of TAMPA constructed by four-point support of varied sizes. The TAMPA having the optimum structure determined from estimation result is produced and its performance is evaluated. For production, the mold made by rapid prototyping is utilized. It is possible to produce the support which had arbitrary shape by using this mold.

Key Words: Actuator, Piezo-Element, Laminated Construction, Tailor-Made, Support Shape

1. 緒 言

圧電アクチュエータは、小型でありながら優れた発生力、高精度、高応答性を有するため、自動車部品、家電製品、マイクロ・ナノデバイス等の様々な部品へ応用されている^{(1),(2)}。しかしながら、圧電素子は変形量が小さいため、変位を増幅させるための機構がこれまで多く提案されている。外部機構を用いたものとしては、変位拡大機構付き積層圧電アクチュエータ^{(3),(4)}、Moonie⁽⁵⁾、Cymbal⁽⁶⁾ などがある。素子自体の構造によって変位を増幅させているものとしては、バイモルフ⁽⁷⁾、Rainbow⁽⁸⁾、Thunder⁽⁹⁾ などがある。これらの手法の問題点として、外部機構を用いたアクチュエータは機械損失を考慮する必要があり、また小型化、低コスト化が難しい。また、素子の構造によって変位を得ているアクチュエータは比較的小型化が容易であるが、発生力を十分に得ることが難しいといった事が挙げられる。

そこで Ervin らは、これらの要件を満たすために Recurve actuator を提案した^{(10),(11)}。Recurve actuator は、反

Fig. 1 Structure of Tailor-made Multilayer Piezoelectric Actuator (TAMPA)

曲するように分極されたバイモルフ型圧電素子からなる片持ちはりである。反曲するように変形するため、素子の先端は平行を保ったまま上下させることができ、効率良くアレイ化することができる。Ervin らは Recurve actuator を並列、または直列にアレイ化し、任意の変位と力を得ている。

Recurve actuator では素子を反曲させるため、目的の方向とは反対向きの変形が含まれている。つまり、本来のバイモルフ型圧電素子の持つ変形を犠牲にしていることになる。我々は、2枚のバイモルフ型圧電素子を両端支持で組み合わせ、それを積層することにより、変位と力を両立させる積層圧電アクチュエータを提案した⁽¹²⁾。

* 原稿受付 2008年3月6日。

^{*1} 名古屋大学大学院工学研究科 (☎ 464-8603 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} 正員、名古屋大学大学院工学研究科。

^{*3} 正員、フェロー、東北大学大学院工学研究科 (☎ 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)。

^{*4} 正員、フェロー、名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: nakajima@mein.nagoya-u.ac.jp

(13). バイモルフ型圧電素子を片持ちはりから両端支持にすることで、変位は4分の1になるが力は4倍となる。また、本アクチュエータは、全体のサイズが同じでもバイモルフ型圧電素子のサイズを調節することにより、変位と力のバランスを広範囲に変更可能なテーラーメイドアクチュエータである(図1)。本論文では、本アクチュエータを TAMP (Tailor-made Multilayer Piezoelectric Actuator) と呼ぶ。

TAMP はバイモルフ型圧電素子を両端支持で組み合わせさせた構造をしているため、その性能は、支持部分の形状や強度に大きく影響を受ける。よって支持部分の最適構造を設計する必要がある。しかしこれまで、バイモルフ型圧電素子を積層した構造において、支持構造がアクチュエータ性能に与える影響に関する研究はほとんどなされていない。本論文ではまず、支持形状がアクチュエータ性能に与える影響を有限要素解析により評価し、その解析結果より、最適な支持構造を決定する。そして決定された最適構造設計に基づいて TAMP を作製し評価を行う。

2. TAMP の概要

両端支持されたバイモルフ型圧電素子は、片持ちはり に比べて変位は4分の1になるが力は4倍になる^{(12),(13)}。すなわち、バイモルフ型圧電素子を用いて力を得るためには、両端支持の方が有効である。このことから、TAMP は、バイモルフ型圧電素子を中央支持と両端支持を繰り返し積層した構造をしている。

TAMP の製作プロセスを図2に示す。まず、土台上に導電性テープを張り付ける(図2-a)。次に、バイモルフ型圧電素子とその導電性テープ上に張り付ける(図2-b)。次に、2つの導電性テープをそのバイモルフ型圧電素子上の両端に張り付ける(図2-c)。次に、バイモルフ型圧電素子とその2つの導電性テープ上に張り付ける(図2-d)。このプロセスを繰り返すことにより任意の積層数の TAMP を作製する(図3)。バイモルフ型圧電素子はシリーズ型であり、素子同士が向かい合った面は同じ電位をとる。そのため、導電性テープを用いることで配線がシンプルになる。

3種類のプロトタイプの特性を表1に示す。それぞれのプロトタイプは、全体のサイズが約 $10 \times 10 \times 10$ mm となるように設計されている。入力電界はすべて 225 V/mm である。表1より、全体のサイズが同様でも変位と力のバランスが異なるアクチュエータが実現できていることが分かる。

3. 有限要素解析を用いた最適構造設計

Fig. 2 Fabrication process of TAMP

Fig. 3 Overview of produced TAMP: (a) schematic figure, (b) photograph

Table 1 Characteristics of TAMP

Prototype	1	2	3
Thickness of bimorph element [μm]	200	400	800
Number of layer	24	16	10
Size [mm ³]	10×10×8.0	10×10×8.5	10×10×9.5
Free displacement [μm]	260	84	29
Maximum force [N]	0.28	0.89	2.1
Resonance frequency [Hz]	150	500	1500

Table 2 Physical properties of piezoelectric element and support

		Piezo element	Support
Density	ρ [kg/m ³]	7400	7500
Piezoelectric constant	d_{31} [pm/V]	224	-
Poisson's ratio	ν	0.31	0.3
Young's modulus	Y [GPa]	60	0.05

従来の TAMP はバイモルフ型圧電素子をはりとして設計されている^{(12),(13)}。そのためバイモルフ型圧電素子が両端の2辺を支持した構造で作製されている。しかし、実際のバイモルフ型圧電素子は板状であり、変形は長さ方向のみではなく幅方向にも起きている。そのため板状のバイモルフ型圧電素子の支持は、角の4点支持が最適である。この場合、TAMP は板の中心支持と4点支持を繰り返し積層した構造となる。以下、4点支持を適用した TAMP の性能を有限要素解析により評価し、最適構造を設

Fig. 4 Deformed configuration and contour map of bimorph piezoelectric element

Fig. 5 Analytical model of four-supported TAMPAs: (a) front view, (b) cross-section of four-support, (c) cross-section of center support

計する。有限要素解析には ANSYS 11.0 (ANSYS Inc.)を用いた。圧電素子と支持部の物性を表 2 に示す。要素タイプは、三次元ソリッド要素として、圧電素子及び支持材に四面体要素を用いた。

まず、支持部の基本的な形状を決定する。図 4 に 10×10 mm の正方形で、厚さ 0.4 mm のバイモルフ型圧電素子の变形形状および等変位線を示す(総要素数: 1350, 総節点数: 1792)。素子はシリーズ型であり、入力電界は 225 V/mm である。図より、横方向だけでなく縦方向にも変形が起り、最も変位が得られるのは板の中心部分であることが分かる。また、等変位線から、中心は円形、4 隅はほぼ三角形に等変位している。したがって、中心支持部は円形、4 点支持部は三角形が適しているといえる。

次に、それぞれの支持部がどのようにアクチュエータの性能に影響するのかを解析する。解析モデルは厚さ 0.4 mm のバイモルフ型圧電素子が 4 層の TAMPAs とした(図 5 (a))。支持部の厚みは、実際に作製することの容易さから 0.4 mm とした。4 点支持部は、実際に作製することを考慮して鋭角部分を 0.5 mm 切り落とした形状とした(図 5 (b))。中心支持部は円形である(図 5 (c))。解析は、4 点支持部の大きさ p が 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 中心支持部の直径 q が 2.0 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 5.0 mm の 16 パターンについて行った。0.5 mm の 4 点支持部のみ正方形である。

Fig. 6 Deformed configurations and contour map for a quarter of four-supported TAMPAs (4 layered): (a) Mesh division map, (b) Free deflection, (c) 0.8 N loaded at center of top layer

例として、 $p=1.0$ mm, $q=4.0$ mm の場合の解析結果を図 6 に示す。図 6 (a)はメッシュ分割図を示す(総要素数: 11803, 総節点数: 19886)。アクチュエータの対称性から4分の1部分のみ示している。図 6 (b)は荷重なし、図 6 (c)はアクチュエータ最上部の中心に 0.8 N の荷重を加えた状態の变形図である。ただし、図(c)は図 6 (b)に対して、変形量の倍率として、約 8.3 倍拡大して表示している。

これらの解析から得られた最上部中心の自由変位とブロッキングフォースの値を用いてアクチュエータ性能を評価、比較する。評価のために、アクチュエータのなす仕事 W が自由変位とブロッキングフォースの積で表されると定義する⁽¹⁰⁾。ここでまず、比較を簡単にするために、自由変位 D とブロッキングフ

Table 3 Analytical results of four-supported TAMP (4 layered)

$q \backslash p$		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
2.0 mm	D^*	0.89	0.78	0.67	0.55
	F^*	0.73	0.94	1.00	1.00
	W^*	0.65	0.74	0.67	0.55
3.0 mm	D^*	0.87	0.77	0.65	0.53
	F^*	0.77	1.02	1.11	1.15
	W^*	0.67	0.78	0.73	0.61
4.0 mm	D^*	0.84	0.74	0.63	0.51
	F^*	0.79	1.07	1.18	1.23
	W^*	0.67	0.79	0.74	0.63
5.0 mm	D^*	0.80	0.70	0.59	0.48
	F^*	0.79	1.09	1.22	1.29
	W^*	0.63	0.76	0.72	0.62

Fig. 7 Analytical force-displacement results of four-supported TAMP (4 layered)

オース F を支持部が理想的な点接触をしている場合の値で以下のように正規化する。

$$D^* = \frac{D}{D_p} \quad (1)$$

$$F^* = \frac{F}{F_p} \quad (2)$$

D_p , F_p はそれぞれ、支持部が理想的な点接触をしている場合の自由変位とブロックングフォースである。厚さ 0.4 mm のバイモルフ型圧電素子 4 層の場合、解析により $D_p = 31.2 \mu\text{m}$, $F_p = 0.79 \text{ N}$ が得られる。式

$$W^* = D^* \times F^* \quad (3)$$

となる。解析を行った 16 パターンの D^* , F^* , W^* の値を表 3 にまとめる。

表 3 より、支持部のサイズによって変位と力のバランスが異なり、変位に優れた形状と力に優れた形状とがあることが分かる。支持部分の面積が小さいほど変位に優れ、大きいほど力に優れるといえる。その中でも W^* の最も高い $p = 1.0 \text{ mm}$, $q = 4.0 \text{ mm}$ の

Fig. 8 Fabrication process of four-supported TAMP

形状が最も効率よく動作しているといえる。理想的な点接触をしている場合 ($W^* = 1$) と、 W^* の最も高い場合 ($W^* = 0.79$) の変位と力の関係を図 7 に示す。点接触に比べ、変位が減少した分、力が増加したアクチュエータとなっている。

4. 製作方法

前節で設計した形状の支持部を持つ TAMP を、インクジェット式ワックス造形によるモールドを用いて作製する。インクジェット式ワックス造形とは、溶融したワックスを一層ずつ印刷していくことで立体構造物を作製する造形手法であり、精密に任意の立体構造物を作製できる。また、この造形物はアセトンやエタノール等で溶解させ容易に除去することができる。造形装置は

Pattern Master (Solidscape Inc.)を用いた。また、積層ピッチは0.038 mmとした。

インクジェット式ワックス造形によるモールドを用いた TAMPA の作製手順を図 8 に示す。バイモルフ型圧電素子は 2 枚の圧電セラミックス (PZT C-6, Fuji Ceramics Corporation) を導電性接着剤 (ドータイト XA-910, Fujikura Kasei Co., Ltd.) で接着して作製した。まず、2 枚のバイモルフ型圧電素子が 4 点支持で組み合わさったパーツから作製する。4 点支持部用のモールドにバイモルフ型圧電素子を組み込み (図 8-a), 支持部となる空間に導電性接着剤を塗りこむ (図 8-b)。支持部に導電性を持たせるのは、向かい合う面を導通させることで配線の手間を減らすためである。導電性接着剤を硬化させ、モールドを除去すれば 4 点支持で組み合わされたパーツが作製される (図 8-c)。このパーツを、中心支持部用のモールドと交互に積層する (図 8-d)。このとき、モールドの穴に導電性接着剤を塗りこむ。再び導電性接着剤を硬化させ、モールドを除去すれば 4 点支持構造の TAMPA が作製される (図 8-e)。最後に、層

の隙間から配線を通せば完成する。

5. 実験

プロトタイプとして、12 層の TAMPA を作製した (図 9)。サイズは $10 \times 10 \times 10$ mm となった。支持部分の形状を図 10 に示す。図 10 (a), (b) はインクジェット式ワックス造形によるモールドの、それぞれ 4 点支持部、中心支持部である。この部分に導電性接着剤を塗りこみ、硬化させるとそれぞれ図 10 (c), (d) のようになる。前節で設計した形状の支持部が作製できていることが分かる。

プロトタイプ (Experiment), 有限要素解析によるシミュレーション (Simulation), および導電性テープにより作製された TAMPA (Old style) の変位と力の関係を図 11 に示す。すべて、バイモルフ型圧電素子は 12 層である。作製したプロトタイプは $65 \mu\text{m}$ の変位と 1.1 N の力を発生させた。実験結果はシミュレーション結果と良く一致しており、設計どおりの TAMPA が作製できているといえる。また、導電性テープにより作製された 2 辺支持の TAMPA よりも性能の向上が見られ、仕事 W^* で比較すると約 1.5 倍であった。これは、先の解析結果で示したとおり、4 点支持にすることにより、変

Fig. 9 Photograph of four-supported TAMPA (12 layered)

Fig. 10 Photograph of mold and support: (a) mold for corner support, (b) mold for center support, (c) corner support, (d) center support

Fig. 11 Force-displacement results of four-supported TAMPA (12 layered)

Fig. 12 Displacement-input voltage results of four-supported TAMPA (12 layered)

Fig. 13 Displacement-input frequency results of four-supported TAMPAs (12 layered)

位と力が共に向上したためと考えられる。支持部にかかる圧力は、力が最大 (1.1 N) の場合でも、4 点支持部で 312 kPa 程度、中心支持部で 87 kPa 程度であり、支持部の強度は十分であったといえる。図 12 に入力電圧と変位の関係を示す。本アクチュエータはヒステリシスとドリフトを有しており、これらの低減と制御に関しては今後の課題とする。図 13 に入力周波数と変位の関係を示す。入力電圧は $20 V_{pp}$ である。共振点付近では変位が乱れ、測定することができなかった (590~780 Hz)。共振周波数は 600 Hz 程度であると思われる。共振点付近で変位が乱れるのは、TAMPAs が板状のバイモルフ型圧電素子を積層した構造であるため、1 枚 1 枚の縦方向と横方向の変形が入り混じり、全体の変形が不安定になるためであると考えられる。したがって、本アクチュエータを安定して使用できるのは 400 Hz 程度までである。

6. 結 言

本論文では、変位と力を両立したテーラーメード型積層圧電アクチュエータ (TAMPAs) の最適支持構造を提案した。まず、バイモルフ型圧電素子が板状であることから、支持を 2 辺支持から 4 点支持へ変更した。このことから、TAMPAs の全体の構造は、板の中心支持と 4 点支持を繰り返し積層した構造とした。次に、4 点支持を適用した TAMPAs の性能を有限要素解析により評価した。支持部の面積の違いによる 16 パターンの解析結果から、支持部分の面積が小さいほど変位に優れ、大きいほど力に優れるということが分かった。その中で、アクチュエータの為す仕事は最も大きいサイズと形状を決定した。このとき為す仕事は、理想的な点接触構造の場合の 0.79 倍であった。最後にプロトタイプを作製し、その性能を評価した。設計した支持形状は、作製にイクジェット式ワックス造形によるモールドを利用することで実現した。評価結果は解析結果と良く一致しており、設計の有効性が確認された。

本研究により、支持部の形状がアクチュエータ性能に大きな影響を与えることが分かった。任意の性能を得ることや、エネルギー効率を上げるためには、支持部の剛性や厚みなど、さらなる解析が必要である。また、強度に関しても、支持部のサイズや物性に依存するため検討が必要である。さらに今後は、本アクチュエータの小型化と生産性の向上を行う予定である。

参 考 文 献

- (1) K. Uchino, Piezoelectric/Electrostrictive Actuators, Morikita Publishing Co., Tokyo (1986). [in Japanese]
- (2) G. H. Haertling, Ferroelectric Ceramics: History and Technology, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 82 (1999), pp. 797-818.
- (3) E. Furukawa, M. Mizuno and T. Doi, Development of a Flexure-Hinged Translation Mechanism Driven by Two Piezoelectric Stacks, *JSME International Journal, Series C*, Vol. 38 (1995), pp. 743-748.
- (4) D. K. Samak and I. Chopra, Design of High Force, High Displacement Actuators for Helicopter Rotors, *Smart Materials Structures*, Vol. 5, no. 1 (1996), pp. 58-67.
- (5) K. Onitsuka, A. Dogan, J. F. Tressler, Q. Xu, S. Yoshikawa, and R. E. Newnham, Metal-Ceramic Composite Transducer, The "Moonie", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6 (1995), pp. 447-455.
- (6) A. Dogan, K. Uchino, and R. E. Newnham, Composite Piezoelectric Transducer with Truncated Conical Endcaps "Cymbal", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 44 (1997), pp. 597-605.
- (7) M. R. Steel, F. Harrison and P. G. Harper, The Piezoelectric Bimorph: An Experimental and Theoretical Study of Its Quasistatic Response, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 11 (1978), pp. 979-989.
- (8) G. H. Haertling, Rainbow Ceramics-A New Type of Ultra-High-Displacement Actuator, *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 73 (1994), pp. 93-96.
- (9) K. M. Mossi, G. V. Shelby and R. G. Bryant, Thin-layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor Properties, *Materials Lett.* Vol. 35 (1998), pp. 39-49.
- (10) J. D. Ervin and D. Brei, Recurve Piezoelectric Strain Amplifying Actuator Architecture, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, Vol. 3 (1998), pp. 293-301.
- (11) J. D. Ervin and D. Brei, Dynamic Behavior of Piezoelectric Recurve Actuation Architectures, *J. Vib. Acoust.*, Vol. 126 (2004), pp. 37-46.
- (12) K. Motoo, N. Toda, F. Arai and T. Fukuda, High Performance Multilayer Piezoelectric Actuator using Bimorph Type Piezoelectric Element, *ACTUATOR 2006*, pp. 499-502.
- (13) K. Motoo, N. Toda, F. Arai, T. Fukuda, T. Matsuno, K. Kikuta, and S. Hirano, Tailor-made Multilayer Piezoelectric Actuator Having Large Displacements and Forces, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72 (2006), pp. 3302-3309. [in Japanese]