三角形状圧電フィルムセンサ/アクチュエータによる 両端単純支持ばりの振動制御実験*

西 垣 勉^{*1}, 川 崎 陽 子^{*2}, 遠 藤 満^{*1}

Vibration Control Experiments of a Simply Supported Beam with Triangular-Shaped Piezoelectric Film Sensor/Actuator

Tsutomu NISHIGAKI^{*3}, Yoko KAWASAKI and Mitsuru ENDO

^{*3} Tokyo Institute of Technology, Dept. of Mechano-Aerospace Engineering, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku,
Tokyo, 152-8552 Japan

Vibration control experiments of a simply supported beam using piezoelectric film (PVDF) sensor/actuator are carried out to verify that the triangular-shaped film pair is effective for multi-modes vibration control in comparison with the rectangular-shaped film pair. In the experiment, analog circuits are used to implement DVFB (Direct velocity feedback) control law. Frequency responses of displacement of a beam subjected to a concentrated harmonic force are measured with sensor outputs and feedback voltages, and those show good agreement with the theoretical results. As predicted theoretically, it is shown in the present experiments that all of the first three vibrational modes are efficiently controlled by the triangular-shaped film sensor/actuator, whereas the rectangular-shaped film sensor/actuator has no control effect against the anti-symmetrical vibrational modes, i. e., the second mode.

Key Words: Experimental Study, Vibration Control, Piezoelectric Film Sensor and Actuator, Simply Supported Flexible Beam, Triangular-Shaped Film

1. 緒 言

圧電フィルムは、柔軟で軽薄なシート状の素材であり、その最大の特徴として、自由な形状に成形して使用できるということがあげられる。よって、本素子を振動制御のための分布形センサ/アクチュエータとして採用し、適切な形状に成形した上で構造物に貼付して一体化させることによって、知能化されたシンプルな構造物を創製できる可能性があると考えられる。この場合、センサ/アクチュエータの形状によって、結果として得られる制御効果は大きく異なってくるものと予想されるが、これらの関係はまだ十分に解明されているとはいえない。圧電フィルムをセンサあるいはアクチュエータとして用いる振動制御問題を扱った従来の研究をセンサ/アクチュエータの形状の観点から総括すれば、大きく二つに分けられると思われる。まず第1には、特定の振動モードの検出あるいは制御を目的として、振動モードのひずみ関数状にセンサ/アクチュエータの形状を決定する model sensor/

actuator があげられるが⁽¹⁾⁽²⁾、本手法は多くのモードを同時に制御する目的には適さない。第2は多モードを同時に制御するために、最も単純かつ基本的な形状である長方形状センサ/アクチュエータを用いた研究であり、著者らも片持ばりにこれらを複数対貼付することにより多モードが同時に制御できることを示した⁽³⁾。しかし長方形状ではフィルムの貼付範囲において逆対称となる振動モードについては検出あるいは操作できなくなることが示唆されており⁽⁴⁾、フィルムの貼付条件によっては着目する周波数帯域内に制御不能に陥るモードが存在してくる可能性がある。よって、分布形センサ/アクチュエータによる広帯域に渡っての振動制御を達成させるためには、センサ/アクチュエータ形状に焦点をあてた設計手法の確立が求められているといえよう。

著者らは、この問題に取り組むための一つの糸口として、前報⁽⁵⁾において、はり制御対象としてとりあげ、まず、任意のフィルム形状に関して一般的な基礎方程式を導出し、これを長方形状および長方形状について基本的と考えられる幅が一次関数状に変化する三角形状⁽⁴⁾センサ/アクチュエータに適用することによって、多くの振動モードを制御するためには、長方形状フィルムよりも三角形状フィルムのほうが適しているとい

* 原稿受付 1999 年 1 月 19 日。

^{*1} 正員、東京工業大学工学部 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

^{*2} 東京工業大学大学院。

E-mail: tnishiga@mes.titech.ac.jp

う物理的考察を行った。さらに、直接速度フィードバック型制御を行った場合の数値解析を行い、長方形状フィルムでは検出・制御できない、貼付範囲で逆対称となる振動モードでも三角形状フィルムによれば検出・制御が可能であることを示し、また、片持ばりを用いた実験を行い、実際に三角形状フィルムセンサ/アクチュエータの動作特性に関する予備的検討を行った。本論文ではそれに引き続き、前報の理論解析結果を実験的に検証するという立場から、特に三角形状センサ/アクチュエータが貼付範囲で逆対称となる振動モードを検出/制御できることを実験的に実際に立証し、三角形状センサ/アクチュエータの長方形状センサ/アクチュエータに対する多モード振動制御における優位性を示すことを目的とする。そこで、逆対称形状の振動モードを有する代表的なはり構造物である両端単純支持ばりを制御対象としてとりあげ、その一点に調和励振入力がかかる場合の定常応答について実験を行い、これら二種類の形状の圧電フィルムを用いた場合の制御効果を定量的に比較し、さらに理論解析結果とよく一致することを示す。

2. 実験

2・1 概要 前報⁽⁵⁾で示したように、長方形状センサ/アクチュエータがその特性から、両端で傾きの等しくなる逆対称の振動モードに対してはセンサの検出量およびアクチュエータの操作量が見かけ上零となり不可観測・不可制御となるのに対し、三角形状センサ/アクチュエータはより適応性のある特性を有しており、逆対称の振動モードに対しても何らかの制御効果を発揮することが期待される。本実験においては、これを立証することに力点をおき、さらに理論解析結果との定量的な比較を試みる。したがって、装置の設計においては、両端単純支持の境界条件を満足させ厳密に逆対称の振動モード形状が実現可能となること、ならびにこの境界条件に影響を与えることなくはりに集中加振力を与え、かつその加振力を同定可能とすることを念頭においた。そこで、境界条件については、はりの両端を薄板で支持することとし、加振力の入力には細いワイヤーを用いることを基本にした。また、三角形状フィルムと長方形状フィルムを用いた場合の制御効果を同一条件で定量的に比較するために、これら2形状のセンサ/アクチュエータを同一面積とした上で、それぞれが貼付されたはりを別個に用意して実験を行うことにした。

2・2 実験装置 実験装置の概要とおもなパラメータをそれぞれ図1、表1に示す。長さ390 mm、幅

Table 1 Parameters of the experimental apparatus

Young's modulus of beam	$E_B = 70.6$	GPa
Length of beam	$l = 3.9 \times 10^{-1}$	m
Width of beam	$b_B = 4.0 \times 10^{-2}$	m
Thickness of beam	$t_B = 1.0 \times 10^{-3}$	m
Density of beam	$\rho = 2.69 \times 10^3$	kg/m ³
Piezoelectric constant	$d_{31} = 30.0 \times 10^{-12}$	C/N
Thickness of film	$t_C = 40.0 \times 10^{-6}$	m
Young's modulus of film	$E_C = 3.1$	GPa
Relative dielectric constant	$\varepsilon = 13$

Fig. 1 Block diagram of the experimental apparatus

40 mm、厚さ1 mmのアルミニウム製のはりの表裏に厚さ40 μm の二対の三角形状圧電フィルム(PVDF:ポリフッ化ビニリデン)をコロケーションが成立するようにエポキシ系接着剤を用いて貼付した。同様に二対の長方形状圧電フィルムを全長にわたって貼付したはりを別途用意した。ここで、接着層の厚さは圧電フィルムのそれとほぼ同程度となることが確認されており、この条件下では接着層の影響は無視することができ、理論解析において圧電フィルムとはりは完全接着されているとみなせる⁽³⁾。実験装置ははりとその支持部、励振入力部、および制御回路から構成される。

2・2・1 はりの支持方法 本実験のように厚さ1 mm程度の薄肉かつ軽量なはりを取扱う場合、通常のようにナイフエッジで両端を支持したのでは、摩擦の影響等によって良好な単純支持条件を得ることは困難になる。そこで、はりの両端を薄板で支持することによって両端単純支持の境界条件を実現させることを試みた⁽⁶⁾。図2のように、片側3本ずつの微小なねじを用いてはりの両端に厚さ0.1 mmのリン青銅板を取付け、これがはりと直角方向に位置するように他端を固定支持する。よって、両端においてははりの水平方向の並進運動は拘束されるにもかかわらず、鉛直軸まわ

Fig. 2 Simply supported beam

Fig. 3 Mode shape of the second mode

りの回転運動に対しては拘束力が非常に小さくなるため、両端単純支持の境界条件と合致することが期待される。以下に本支持方法が妥当であることを検証しよう。まず、表 2 に 1 次から 4 次までの固有振動数の理論値と実験値の比較を示す。両者はよく一致しているといえる。次に、共振点における振動モード形状の一例として、二次モード形状の理論値と実験値を比較したのが図 3 である。ここで、横軸ははりの長手方向に関する無次元化座標、縦軸は最大値で無次元化した応答振幅であり、図 3 中、実線が理論値、黒丸が実験値を示す。両者はよく一致しており、実際に逆対称モードが励起されていることが確認できた。固有振動数および振動モード形状に関する以上の考察から、本支持方法によって両端単純支持の境界条件が実現できていることが検証された。

2・2・2 励振方法および加振力の同定方法 はりの境界条件に影響を与えることなく励振力を伝達するために、タングステンワイヤを用いた⁷⁾。図 4 に示すように、動電型加振器のヘッドにジグを設置し、その中央部に摩擦の小さいテフロンを取付けた。上端をはりに固定した直径 0.06 mm のタングステンワイヤを、テフロンの中心に鉛直方向にあけた微小な穴に通し、さらにプーリーを介してその下端に質量 33 g の鋼球をつり下げた。この機構を用いることで、ワイヤの張力を一定に保持したまま、その一点を水平方向に強制変位励振することを可能にした。ここで、タングステン

Table 2 Natural frequencies of the beam

Mode No.	Theory Hz	Experiment Hz
1	15.35	15.15
2	61.41	60.15
3	138.13	135.53
4	245.65	241.31

Fig. 4 Excitation method using a fine wire

Fig. 5 Estimation of the excitation force

ワイヤは加振器とはり間において、水平方向に関しては非常に柔軟なばねとして働くと考えられる。図 5 は、ワイヤの励振変位とはりへの励振入力ベクトルの幾何学的関係を示している。ここで、ワイヤが鉛直方向に対してなす角 θ が微小な場合には、点 A に入力される励振力 F を同定する式は次式となる。

$$F = T \sin \theta \approx T \tan \theta \approx \frac{T}{L} w \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T はワイヤの張力、 L はワイヤの長さである。また、図 5 における点 A と点 B の水平方向相対変位を w と定義し、これを図 4 に示す 2 個の非接触変位センサ(渦電流式、測定範囲 5 mm、分解能 10 μ m)を用いて測定している。本実験においてワイヤ長さ L は 60 mm であるのに対し、励振変位 w は高々 1~2 mm であるので、実際に角度 θ は微小となり、式 (1) の近似が成立していると考えてよい。また、ワイ

ヤの張力 T は、鋼球の質量と重力加速度の積によって評価した。本手法によって加振力が同定可能であることを検証するために予備実験を行った。ワイヤの励振変位振幅が常に一定となるように加振器への入力を調整して、はりを調和励振した場合の変位の周波数応答について、式(1)から計算される加振力を入力として理論解析によって求めた結果と実際の測定結果の比較を行った。図6に加振力 F を 3.2×10^{-3} Nとした場合の結果を示す。ここで、横軸は周波数、縦軸は駆動点の応答振幅であり、実線が解析結果、黒丸が実験結果を示す。両者がよく一致していることから、本手法により加振力が同定可能であることが確認できた。なおモード減衰比の同定は第3章に示す方法で行った。

2.2.3 制御回路 前報⁽⁵⁾において、同一形状のセンサ/アクチュエータに直接速度フィードバック形制御を行うことで、すべての振動モードに関して系の

Fig. 6 Comparison of the estimated response and the measured response of the beam

Fig. 7 Analog circuit

安定性が保証され、広帯域制御に有効であることを示した。本実験では、この直接速度フィードバック形制御を実装するために図7のようなアナログ回路を作成した⁽³⁾。ここで用いた抵抗およびコンデンサのパラメータはそれぞれ、 $R_1=R_2=R_5=R_9=100\ \Omega$, $R_3=R_6=R_8=1\ \text{k}\Omega$, $R_4=R_7=100\ \text{k}\Omega$, $C_1=0.1\ \mu\text{F}$, $C_2=0.01\ \mu\text{F}$ である。圧電フィルムセンサの出力電圧を測定する場合には、圧電効果によって励起されたフィルム表面電荷が、測定機器の入力抵抗を通して電流として流出してしまうため、その結果として電圧降下が生じ正しい発生電圧が測定できない。これは、圧電フィルムがコンデンサとして挙動し、機器の入力抵抗とともにフィルタ回路を形成していることを意味する。このフィルタ回路のカットオフ周波数は機器の入力抵抗と圧電フィルムの静電容量の積、すなわち時定数に依存する。そこで本実験回路では圧電フィルムセンサとインピーダンス整合をとり、センサ出力電圧に正確に追従するボルテージフォロワを前段部分に使用した。一般にこのようなバッファ回路を用いた場合の入力抵抗は $1\ \text{G}\Omega$ 以上となるため、表1のパラメータを用いて計算した圧電フィルムの静電容量 ($0.018\ \mu\text{F}$) を考慮すればカットオフ周波数は $0.01\ \text{Hz}$ 以下となり、後述するように $10\ \text{Hz}$ 以上の振動応答を制御の対象としている本研究においてはこの影響は無視できる。なお、圧電フィルム自体にも漏れ抵抗が存在するが、体積抵抗率から計算した本圧電フィルムの電気抵抗は $58\ \text{G}\Omega$ となり非常に大きいため、動的応答を測定する場合にはほとんど問題とはならない。本回路で測定したセンサ信号 V_s を、後段部分でさらに微分器および増幅器を通すことによって、直接速度フィードバック形制御を実装した。回路の出力信号 V_{out} はローパスフィルタ(カットオフ周波数 $5\ \text{kHz}$)を通して高周波のノイズを除去したのち、最大出力 $\pm 150\ \text{V}$ の高出力増幅器によって増幅し、対応する圧電フィルムアクチュエータにフィードバック電圧として負荷した。

2.3 実験方法 発振器によって発生させた正弦波をアンプで増幅して動電形加振器に入力することにより、ワイヤを変位加振し、はりの一点 ($x=78\ \text{mm}$) に調和励振入力を与えた。そのときの、励振点におけるはりの変位、センサ出力、フィードバック電圧の定常振幅を三次モードまでの帯域にわたって測定し、それぞれを加振力の大きさを割った値を dB 表示して周波数応答曲線を求めた。この測定を三角形および長方形フィルムが貼付されたはりを用いて非制御時および制御時についてそれぞれ行った。また、制御時におけるフィードバックゲインは 10 倍とした。

3. 実験結果と理論解析結果の 比較および考察

一対の三角形状センサ/アクチュエータを用いた場合の非制御時、および制御時の定常状態における変位(駆動点コンプライアンス)、センサ出力、フィードバック電圧の周波数応答について、実験結果を理論解析結果と比較したのが図8~10である。ここで、図8と9において、それぞれ(a)が非制御時、(b)が制御時の応答を示している。また各図において、横軸は周波数、縦軸は励振力の大きさに割った値をdB表示した応答の定常振幅を示し、図8においては $0\text{ dB}=0.201\text{ m/N}$ 、図9と10においては $0\text{ dB}=0.58\text{ V/N}$ となっている。図中、実線が理論解析結果、白丸が実験結果である。理論解析において使用した各モード減衰比は、実験における減衰自由振動応答波形から同定したものであり、一〜三次モードについてそれぞれ $\zeta_1=1.52\times 10^{-3}$ 、 $\zeta_2=2.77\times 10^{-3}$ 、 $\zeta_3=3.43\times 10^{-3}$ である。全体を通して、理論値と実験値はよく一致していることが確認できる。また、二次モード(逆対称モード)に対しても制御効果があることが確認できた。ここで、高次モードになるにしたがって、実験における制御効果が理論解析のそれよりも小さくなる傾向にあるが、

(a) Without control ($0\text{ dB}=0.201\text{ m/N}$)

(b) With control ($0\text{ dB}=0.201\text{ m/N}$)

Fig. 8 Displacement response of the beam with triangular sensor/actuator

これは、実験においては制御器に近似微分回路を用いているのに対し、理論解析では理想的な微分演算を施しているためこの差異が高周波になるにしたがって現れたものと考えられる。次に、三角形状フィルムと同一面積の長方形状フィルムセンサ/アクチュエータを二対貼付したはりについて、このうち一対を作動させて実験した場合の非制御時、および制御時の変位(駆動点コンプライアンス)の周波数応答を図11に示す。ここでも理論値と実験値はよく一致しているが、三角形状フィルムと長方形状フィルムの制御効果を比較すると、長方形状フィルムでは逆対称モード(二次モード)に対しては制御効果が非常に小さいことがわかる。そこで、このフィルム形状による制御効果の違いをより明確にするために、1次から3次までの各共振ピー

(a) Without control ($0\text{ dB}=0.58\text{ V/N}$)

(b) With control ($0\text{ dB}=0.58\text{ V/N}$)

Fig. 9 Response of the triangular sensor

Fig. 10 Feedback voltage applied to the triangular actuator ($0\text{ dB}=0.58\text{ V/N}$)

(a) Without control (0 dB=0.201 m/N)

(b) With control (0 dB=0.201 m/N)

Fig. 11 Displacement response of the beam with rectangular sensor/actuator

クの振動抑制効果について実験結果と理論解析結果をdB表示で比較したのが表3である。表3より、実験において、対称モードである一次および三次モードについては、三角形状フィルムと長方形状フィルムではほぼ同等の制御効果が得られていることがわかる。他方、長方形状フィルムでは二次モードの振動抑制効果が0.1 dBと皆無に等しいのに対し、三角形状フィルムでは理論解析結果とほぼ同等の14.1 dBの制御効果があり、逆対称モードでも制御できることが実験的に立証された。

4. 結 言

本論文では、三角形状圧電フィルムを分布形セン

Table 3 Comparison of control effects

Mode	Triangular film		Rectangular film	
	Theory dB	Experiment dB	Theory dB	Experiment dB
1	-22.7	-21.7	-22.7	-20.5
2	-18.3	-14.1	-0.0	-0.1
3	-16.5	-9.5	-16.5	-12.1

サ/アクチュエータとして用いた両端単純支持ばりの振動制御について、前報で示した理論解析結果の実験的検証を行った。同一面積の三角形状フィルムと長方形状フィルムについてそれぞれ振動制御実験を行った結果、実験結果と理論解析結果が定量的に一致することが確認された。さらに、長方形状フィルムでは逆対称モード(偶数次モード)がほとんど制御不可能であったのに対し、三角形状フィルムでは対象とした1次から3次までのすべての振動モードに対して制御効果が確認され、本手法が広帯域な制御に適していることが実験的に検証された。なお、本解析および実験では、振動制御におけるフィードバックゲインを固定しているが、これを変化させた場合の制御効果についても調べることによって、より広帯域にわたる振動制御法について検討していくことを今後の課題としたい。

文 献

- (1) Lee, C. K. and Moon, F. C., *ASME J. Appl. Mech.* 57 (1990), 434-441.
- (2) Tzou, H. S. and Hollkamp, J. J., *Smart Mater. Struct.*, 3 (1994), 277-284.
- (3) 西垣勉・ほか2名, 機論, **63**-615, C (1997), 3728-3734.
- (4) Burke, S. E. and Hubbard, J. E. Jr., *Contr. Dyn. Sys.*, 36 (1990), 223-273.
- (5) 西垣勉・ほか2名, 機論, **65**-633, C (1999), 1937-1945.
- (6) Ochs, J. B. and Snowdon, J. C., *J. Acoust. Soc. Am.* **58**-4 (1975), 832-840.
- (7) Evensen, D. A., *ASME J. Appl. Mech.*, 33 (1966), 553-560.