

# 圧電フィルムを用いた薄肉円筒殻の制振とその評価

Estimation on Vibration Control of Thin Cylindrical Shell Using Piezoelectric Films

工藤篤博<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>

Atsuhiro KUDO and Daigoro ISOBE

- 1) 工修 富士写真フイルム株式会社 (〒106-8620 東京都港区西麻布2-26-30)
- 2) 工博 筑波大学講師 機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

Thin cylindrical shell is one of the fundamental shell elements, and many machines and structures are constituted by thin cylindrical shells. Vibration control of thin cylindrical shells is necessary for strength design and noise reduction. Piezoelectric film has become a major vibration control device suited for curved structures since it has remarkable characteristics in sensitive response and flexibility. In this paper, the effects of an attached position and a change in length of the piezoelectric film on vibration control is investigated analytically by using the Finite Element Method, and they are confirmed visually by laser-holographic interferometer.

**Key Words:** Piezoelectric Film, Vibration Control, Thin Cylindrical Shell, Finite Element Method, Laser-Holographic Interferometer

## 1. 緒言

円筒殻は殻構造要素として基本的な構造であり、多くの機械や構造物に適用されている。このような円筒殻における振動問題は、疲労破壊に対する強度設計や騒音低減といった点から重要な課題となっている。そこで本研究では、制振デバイスとして圧電フィルムを用いた薄肉円筒殻の制振について検討を行った。優れた柔軟性、反応性を有する圧電フィルムは、円筒殻のような曲面構造物に適した制振デバイスとして注目されている。圧電フィルムを用いた薄肉構造物の制振に関する研究例は数多くある<sup>(1)-(3)</sup>が、これらの制振効果の評価方法は、局所的な振動変位計測により系全体の振動挙動を推測することが一般的であった。しかし、円筒殻モデルについては軸対称構造であるゆえ、系の振動モードにおける腹や節の正確な位置の特定が困難である。そのため、制振効果を曲面全体に渡る計測により評価を行うことが望ましい。本研究では、薄肉円筒殻の高効率な制振を実現するため、有限要素法を用いた数値解析により、センサおよびアクチュエータの貼付位置や長さ変化における制振効果の影響を調べた。また、実際に制振システムを構築し、薄肉円筒殻の制振効果の評価方法として微小振動の計測が可能でレーザーホログラフィ干渉装置を用い、曲面全体に渡る振動挙動を観察して制振効果を検証した。

## 2. 薄肉円筒殻モデル

本研究では、図1に示されるようなアルミニウム製の薄

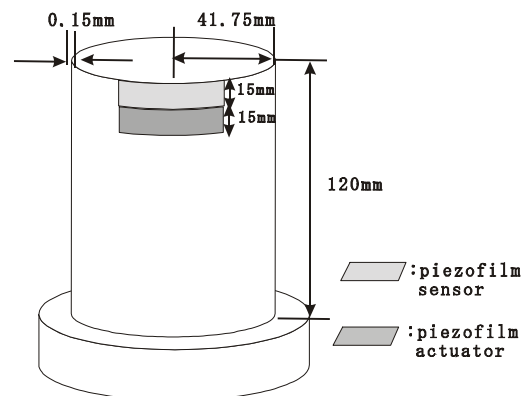


Fig.1 Schematic of thin cylindrical shell

肉円筒殻を用いた。下端を十分な重量のある真鍮製の円柱固定台に取り付けて固定し、片持ち状態とした。圧電フィルム(厚さ0.052mm)は円筒殻外側の自由端の縁に沿って互いの極性を同じ向きにして貼付し、上側をセンサ、下側をアクチュエータとして使用した。なお、本実験では、直接出力フィードバック制御則を用いているため、センサとアクチュエータを同一形状とし、センサからの信号を反転増幅してアクチュエータへ入力した。また、本制振システムの最大印加電圧は±120Vである。

解析では、圧電フィルムの貼付長さが異なる5つのモデルを作成し、有限要素法による周波数応答解析を行うことにより、圧電フィルムの最適な貼付位置/長さを導出した。本解析では20節点アイソパラメトリック立体要素を用いた。

なお、本研究では薄肉円筒殻の低次モードである

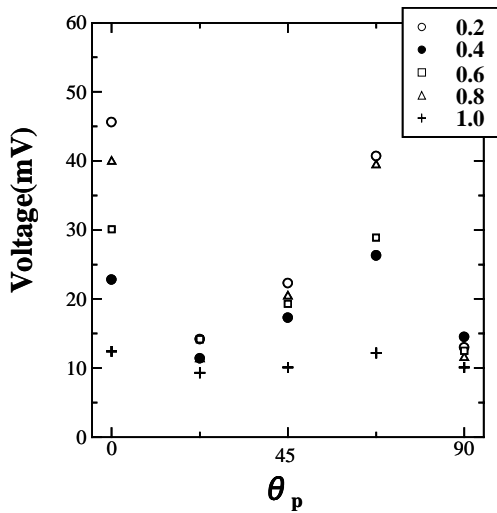


Fig.2 Output voltage of sensor attached at various position

Mode3-1, Mode4-1, Mode2-1の振動を対象にして, 制振効果を検討した.

### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 センサの最適貼付位置/長さ解析

まず, 振動を検知するセンサの最適貼付位置/長さを調べるため, 固定端近傍に動荷重を与え, そのときに発生するセンサ出力電圧を解析により算出した. 図2に Mode3-1におけるセンサ貼付位置/長さ変化に対する出力電圧の関係を示す. ここで,  $\theta_p$ はセンサの長手方向における中心と加振点との角度を示している. この結果を見ると  $\theta_p=0^\circ$ ,  $\theta_p=67.5^\circ$ 付近でセンサの反応が良いことが確認できる. この位置は周方向の振動の腹が当たる位置であり, 最もひずみが集中する位置でもある. また, 逆に  $\theta_p=22.5^\circ, 90^\circ$ は振動の節が当たる位置であり, その位置にセンサを貼付しても良い反応が得られないことが確認できた. また, センサの最適な長さについては貼

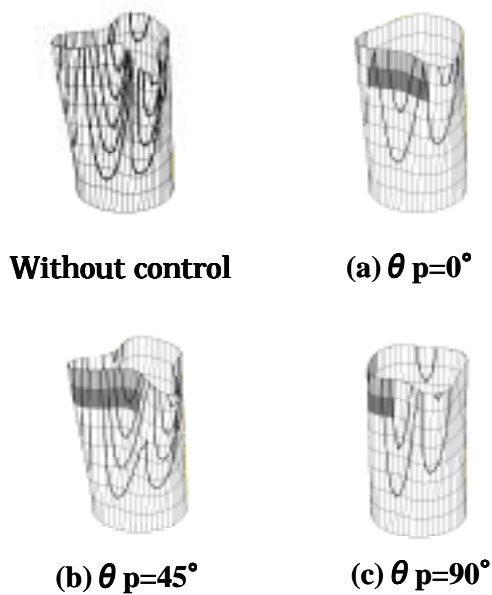


Fig.3 Vibration control using piezofilms attached at various position ( $l_p/l=0.2, V_{IN}=\pm 300V$ )

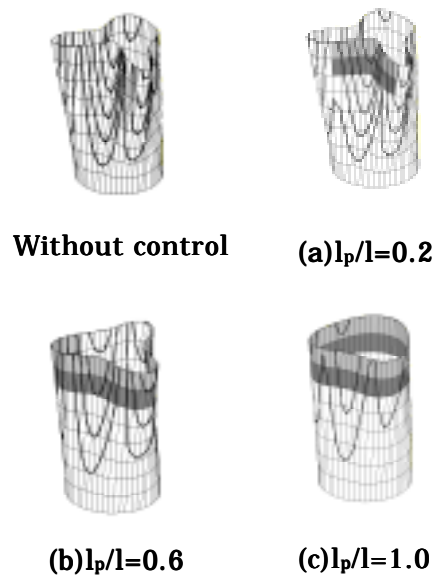


Fig.4 Vibration control using piezofilms attached by various lengths ( $V_{IN}=\pm 100V, Mode3-1$ )

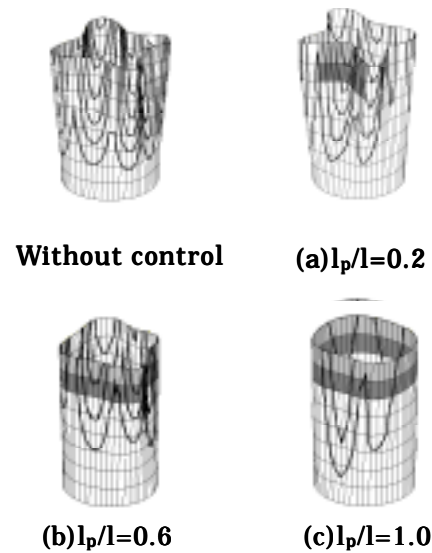


Fig.5 Vibration control using piezofilms attached by various lengths ( $V_{IN}=\pm 100V, Mode4-1$ )

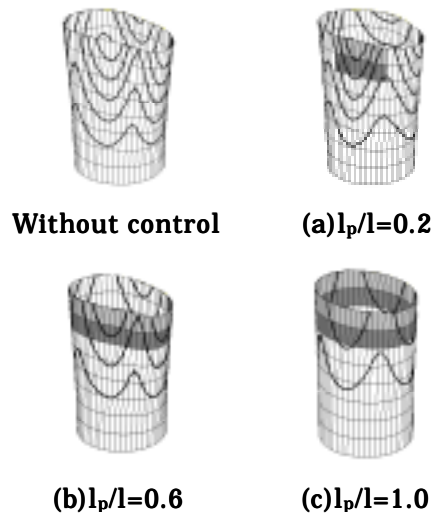


Fig.6 Vibration control using piezofilms attached by various lengths ( $V_{IN}=\pm 100V, Mode2-1$ )

付範囲においてひずみ総和が大きくとれる $l_p/l=0.2, 0.8$ の際に大きな反応が得られることが確認できた．なお，他のモードに対しても， $l_p/l=0.2, 0.8$ 付近にセンサとしての最適な長さがあることを確認した．

### 3.2 アクチュエータの最適貼付位置/長さ解析

次に，アクチュエータの最適貼付位置/長さを調べるために，定常振動の振動制御シミュレーションを行った．なお，定常振動は固定端近傍に動荷重を与えることにより発生させた．図3に，Mode3-1におけるアクチュエータ貼付位置を変化させたときの振動制御シミュレーション結果を示す．これらの図において，解析結果は実際の変位量の10000倍に拡大して表示しており，図中のコンターラインはたわみ量を表している．圧電フィルムの長さは $l_p/l=0.2$ とし，印加電圧は $\pm 300V$ に設定してある．これらの結果を見ると，アクチュエータの中心位置が振動波の腹に当たる位置に貼付されていると，最も制振効果が大きいことが確認できる．逆に，振動波の節に当たる位置にアクチュエータが貼付されている場合には，最も制振効果が小さいことが確認できる．振動波の腹に当たる位置には，ひずみエネルギーが最も集中するため，この位置に貼付されたアクチュエータはそのひずみエネルギーを効率的に消散し，その結果，系全体の振動エネルギーを減少させる．また，アクチュエータの中心を振動波の節の付近に貼付しても，その付近には大きなひずみエネルギーが蓄積されていないことから，振動エネルギーは効果的に消散されず制振効果は小さい．図4～図6には，各振動モードに対してアクチュエータの貼付長さを変化させたときの定常振動の振動制御シミュレーション結果を示す．アクチュエータの貼付位置は $p=0^\circ$ とし，印加電圧は $\pm 100V$ に設定してある．また，変位量は実際の10000倍に拡大して表示している．この結果を見ると，同じ印加電圧では短いアクチュエータほど制振効果が小さく，長いアクチュエータほど大きな発生力が得られるため制振効果が大きいことが分かる．

以上の結果より，Mode3-1，Mode4-1，Mode2-1の低次モードが発生するような薄肉円筒殻に対して制振を行う場合，これに適したセンサの長さは $l_p/l=0.2, 0.8$ 付近に存在し，アクチュエータとしてはより長いもの( $l_p/l=1.0$ )が適していることが判明した．

### 4. 強制振動の制御実験

以上の解析結果の妥当性を確認するため，強制振動に対する制御実験を行った．図7に実験により得られた非制御時および制御時におけるセンサ出力電圧の時刻歴応答を示す．(a) $l_p/l=0.2$ の場合に関しては，センサ出力電圧の大きな変化は見られず，振動抑制効果が極めて小さいことが分かった．アクチュエータの貼付長さが薄肉円筒殻の円周に対して短いため，振動を抑制するのに十分な制御力を兼ね備えてはいなかったと考えられる．(b) $l_p/l=0.6$

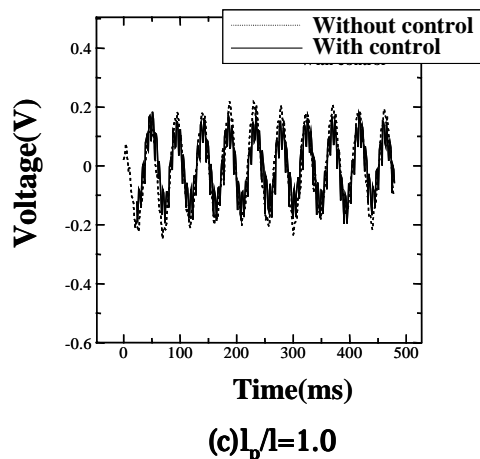
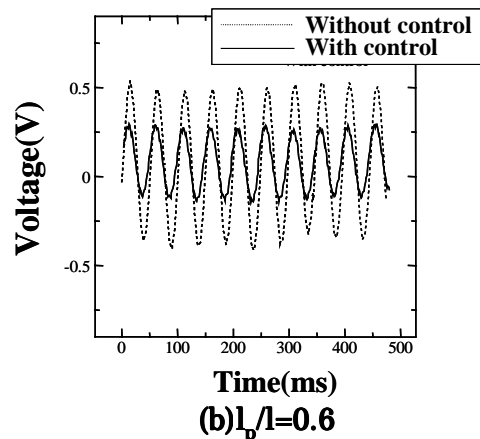
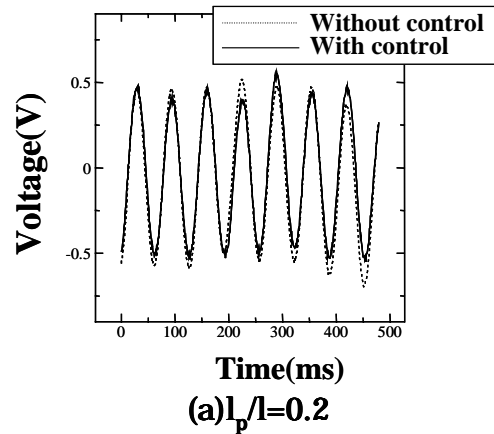


Fig.7 Vibration control effect observed in output voltage

の場合については，制御をかけたときセンサの出力電圧が大きく減少していることが確認できた．したがって，この長さにおいては，比較的良好な振動抑制効果があることが分かった．(c) $l_p/l=1.0$ の場合については，ほとんど振動抑制効果は見られなかった．これは，振動によって発生するセンサ出力電圧の大きさが非常に微小であったため，振動の抑制を行えるだけの十分な制御電圧を供給できなかったからである．以上の結果をまとめ，センサ出力電圧の変化から読み取った振動抑制効率を図8に示す．ここで， $V_0$ は制御前のセンサ出力電圧， $V$ は制御後のセンサ出力電圧を表す．このグラフを見ると，どの振動

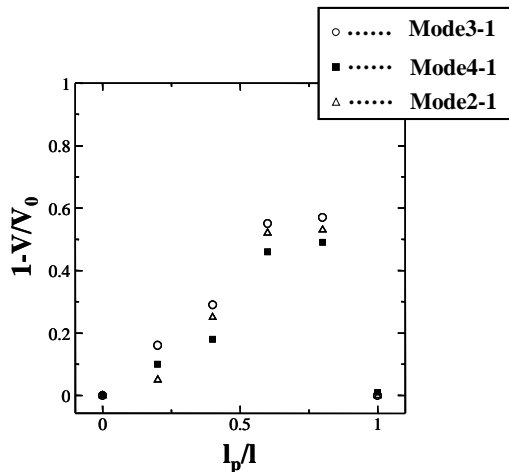


Fig.8 Efficiency of vibration control using piezofilms attached by various lengths

モードに対しても、 $l_p/l=0.8$ 付近に最も大きな振動抑制効果が期待できる圧電フィルムの長さがあることが分かった。

図9にレーザーホログラフィ干渉装置を用いた振動可視化実験により得られた干渉縞を示す。ここで、干渉縞はたわみ量を表しており、干渉縞の間隔が狭いほどたわみ量の勾配が大きいことを示している。(a)  $l_p/l=0.2$ の場合は、センサの出力電圧の変化と同様に干渉縞の変化は見られず、振動抑制効果はほとんど確認できなかった。(b)  $l_p/l=0.6$ の場合には、制御をかけることによって縞の間隔が広がっており、曲面全体において約40～50%の振動抑制効果が現れていることが確認できた。(c)  $l_p/l=1.0$ の場合は、センサ出力電圧の不足により、アクチュエータへ十分な電圧を供給することができず干渉縞からも振動抑制効果が見られないことが確認できた。この実験でも最も制振効果の大きい圧電フィルムの長さは $l_p/l=0.6\sim 0.8$ 付近に存在することが判明し、先の解析結果と一致していることが確認できた。

## 5. 結言

本研究では、薄肉円筒殻の制振を実現するため、有限要素解析により効率良い制振が可能なセンサおよびアクチュエータの貼付位置/長さを導出した。さらに、その解析結果を確認するため、レーザーホログラフィ干渉装置を用いた振動可視化実験によって曲面全体に渡り振動抑制効果を検証した。

有限要素解析の結果より、Mode3-1、Mode4-1、Mode2-1の振動モードが卓越する薄肉円筒殻に対して制振を行うのに最適な長さは、センサとしては $l_p/l=0.2$ および0.8付近の長さであり、またアクチュエータとしてはより長いものであることが分かった。さらに、強制振動の制御実験ではセンサおよびアクチュエータの長さが $l_p/l=0.8$ 付近のときに最も制振効果が大きかったため、解析結果の妥当性が確認された。

以上のように、制振を行うのに最適な圧電フィルムの

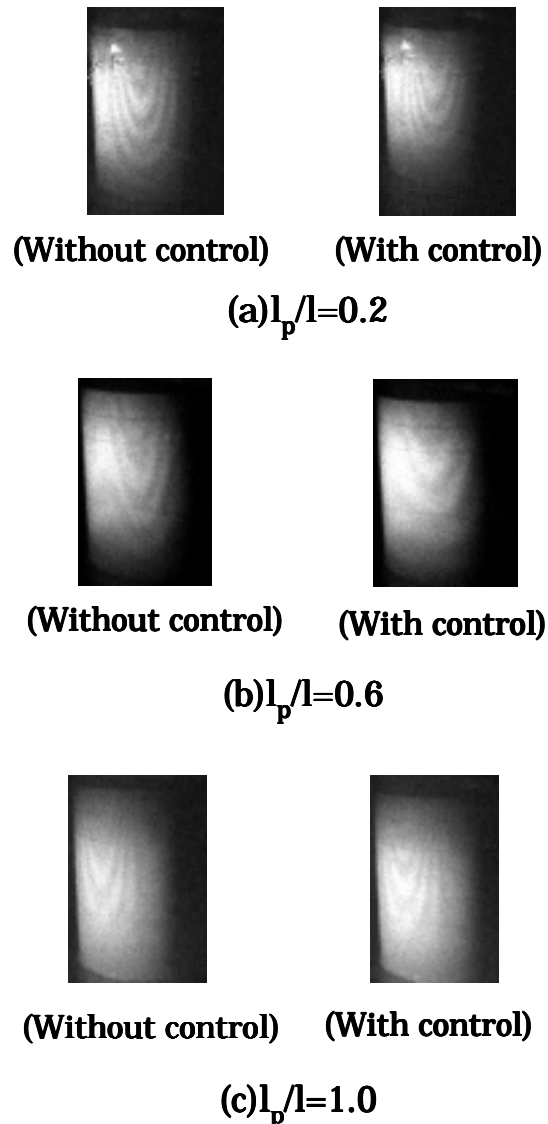


Fig.9 Vibration control effect observed by laser-holographic interferometer

位置や長さを設計段階において選定する際、有限要素解析による同定法は有効な手段の一つとして使用できることが示された。

## 参考文献

- (1) 谷 順二, 裘 進浩, 三浦 英久: 円筒殻の圧電フィルムによる振動制御, 日本機械学会論文集(C編), Vol.60, No.570, pp.443-449, 1994.
- (2) 西垣 勉, 河野 篤史, 遠藤 満: 厚さの異なる圧電フィルムを用いたセルフセンシングアクチュエータの開発, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference '99論文集, Vol.B, No.99-7, pp.502-505, 1999.
- (3) C.-K.Lee, F.C.Moon: Modal Sensors/Actuators, Transactions of the ASME, Vol.57, pp.434-441, 1990.