

Development of Electrostrictive Polymer Actuators for Active Control of Turbulence

○筒井 英成 (東大工), 鈴木 雄二 (東大工), 笠木 伸英 (東大工)

Hideaki TSUTSUI, Yuji SUZUKI and Nobuhide KASAGI

Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan

A deformable electrostrictive actuator of 5mm in diameter was developed for active control of turbulence. It is found that static and dynamic responses were improved by applying some back pressure to the actuator diaphragm. Vertical displacement of about 0.2 mm was obtained at the first resonance frequency of about 400 Hz. It is estimated that an actuator of 1 mm in diameter would achieve 0.2 mm displacement with a frequency response flat up to 1kHz.

1. 序論

乱流およびそれに伴う輸送現象のアクティブ制御は、熱・物質輸送、化学反応などの増進・抑制・パターン制御を通じて、機器の高性能化、高効率化、小型化、低騒音化等を図るための重要な技術的課題である。なかでも、壁乱流については、直接数値シミュレーションによりフィードバック制御の評価が行われ、高い効果を持つことが示されている¹⁻³⁾。

フィードバック制御の実現には、センサ、アクチュエータ、コントローラの3つの要素の開発と、これらをシステムとして統合することが必要となる。特に、アクチュエータについては、寸法・応答時間が壁近傍の準秩序構造の持つ時空間スケールに対して小さいこと、アクチュエータ動作量が十分大きいこと、動作環境に対してロバストであること、消費エネルギーが小さいこと、などが要求される。マイクロマシン分野で最も一般的に用いられるアクチュエータは静電気力を用いたものであるが、変位が小さく、清浄な動作環境が必要なことから、乱流制御には適さない。また、マイクロマシン技術で製作されたデバイスは本質的に平面内の2次元構造であるため、流体に対して制御量を加えるための構造として十分な工夫が必要となる。

今までに、流体制御を想定したマイクロアクチュエータとして、圧電素子^{4,5)}、電磁力^{6,7)}、空気圧⁸⁾などが提案されているが、変位が小さい、消費エネルギーが大きいなどの課題も多く、上述の要求項目をすべて満たすアクチュエータの動作原理は確立されていない。最近、Peltreら^{9,10)}は、生体の筋肉に近い特性を持つアクチュエータとして、柔軟性の高い絶縁膜を電極で挟んだコンデンサ型の電歪ポリマーアクチュエータを開発した。膜厚1 μm あたり数10Vの高電圧が必要であるものの、シリコンゴムを用いたアクチュエータでは数10%以上の歪みと1kHz以上の高い動特性を、アクリル樹脂を用いた場合では100%以上の歪みが得られることを示している。このアクチュエータは、シリコンプロセスを必要としない簡単な構造のアクチュエータであり、エネルギー消費量が比較的小さいなどの優れた特長を持つ。

本研究では、DNSにより高い制御効果が確認され、環境に対してロバストである、壁面変形型^{11,12)}を採用し、電歪ポリマーを動作原理としたアクチュエータの試作と特性評価を行った。特に、著者らがフィードバック制御の適用を想定するチャンネル乱流風洞(チャンネル幅50mm, バルク平均流速7.5m/s)の流れ条件では、アクチュエータの大きさ1mm, 壁垂直方向変位0.2mm, 動作周波数で300Hzが要求され、これらを満たす電歪アクチュエータが製作可能であるかの検討を行った。

2. 電歪ポリマーアクチュエータの構造とその動作原理

Fig. 1に電歪ポリマーアクチュエータの動作原理を示す。ポリマー弾性膜は、柔軟な電極で挟まれ(Fig. 1(a)), 電圧が印可されると電極間の静電引力により膜厚方向に圧縮され、平面方向に伸長する(Fig. 1(b))。この時、膜に発生する膜厚方向応力 σ は次式で表されるように電界の2乗に比例する⁹⁾。

$$\sigma = \epsilon_0 \epsilon E^2 \quad (1)$$

ここで、 ϵ_0 , ϵ , E はそれぞれ、真空の誘電率、比誘電率、電極間の電界である。従って、大きな変形を得るには高電界印可可能な絶縁破壊強度の大きい材料を用いる必要がある。

本研究では、Fig. 2に示すように、円形キャビティ上に電歪ポリマー膜を設置し、膜の伸長を壁垂直方向の変位に変換する壁面変形アクチュエータを検討した。この構造では、背圧 P が正圧であれば膜は上方に、負圧であれば下方に変形し、壁面変形方向を決めることができる。

電歪ポリマーとしては、80 μm 厚のシリコンゴム(東レ・ダウコーニング・シリコン(株)製, SE9188, 絶縁破壊強度30V/ μm)を用いた。また、柔軟電極としては、高導電性カーボンブラックパウダー(ライオン(株)製, ケッチェンブラック EC)を膜の両面に塗りつけた。膜の直径は5mmである。

3. 電歪ポリマーアクチュエータの特性評価

Fig. 3に予備実験として行った直径6mmのアクチュエータの動作を示す。壁垂直方向に約0.6mmの大変形が生じることが観察される。

Fig. 4にアクチュエータの特性評価に用いた実験装置を示す。

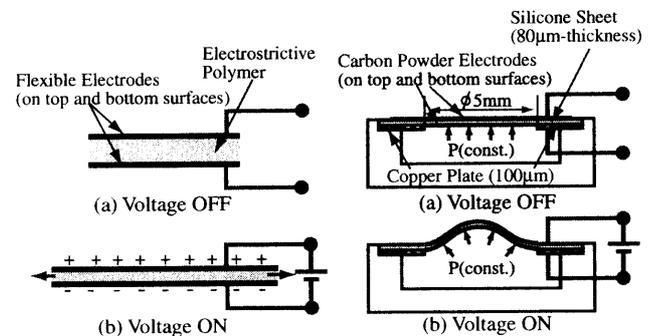


Fig. 1 Principle of electrostrictive polymer actuator

Fig. 2 Wall deformable polymer actuator

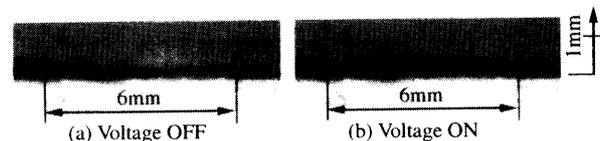


Fig. 3 Close-up view of electrostrictive wall-deformable actuator

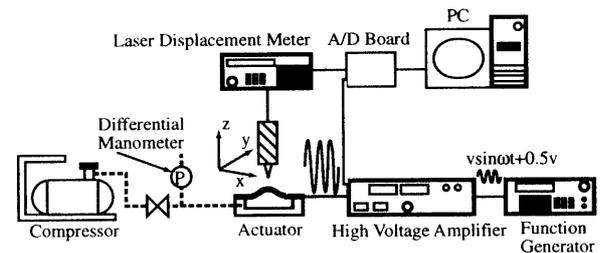


Fig. 4 Experimental equipments

す。ファンクションジェネレータの出力を高電圧アンプで増幅してアクチュエータに印可し、レーザー変位計(株)キーエンス製, LC-2440)を用いて変位を測定した。背圧はコンプレッサとレギュレータを用いて設定し、水マノメータで測定した。

Fig. 5に電圧を印可せずに背圧を0~3.0kPaに変化させた場合のアクチュエータ形状の変化を示す。図中の点線は、アクチュエータを一定圧力を受ける弾性体の円板と仮定し、中心における変位が等しくなるようにプロットしたものであり、背圧がおおよそ300Pa以下では、変形形状はほぼ一致することが分かる。

次に、静的な印可電圧に対するアクチュエータの特性評価を行った。Fig. 6にアクチュエータ中心における変形量を示す。背圧0の場合、電界が低い時の変形量は小さいが、20V/μm付近から急激に増大して31V/μmで0.16mmとなる。背圧を加えた場合、変形量は、滑らかに変化し、式(1)で表される応力の変化から予想されるようにほぼ電界の2乗に比例する。これは、背圧により生じる微小な曲率により、膜の座屈が起こりやすくなるためと推測される。また、シリコーンは非線形の弾性を持ち、歪みの増加に対し弾性率が增大するため、背圧を増加させると変形量は徐々に減少する。従って、本研究の実験条件では、最も背圧の小さい1.5×10²Paにおいて変形量が最大になった。

Fig. 7にアクチュエータの周波数応答を示す。電極間には、次式で表される正弦波電圧を印可した。

$$V(t) = 1.25 \sin 2\pi f t + 1.25 \text{ (kV)} \quad (2)$$

周波数の増加に伴い振幅は徐々に減少し、400Hz近傍で1次の共振周波数を持つ。位相遅れは200Hz付近で0.25πと比較的大きく、膜の粘弾性の影響が認められる。振幅は背圧1.7×10²Paで最も大きく、Fig. 6に示した静的変位が最も大きい背圧1.5×10²Paとほぼ一致している。従って、本研究で試作したアクチュエータは、静特性、動特性が最適となる背圧はほぼ一致し、1.5×10²Pa付近であることが示される。

4. スケール効果の検討

以下ではアクチュエータを、弾性体円板と近似し、スケール効果を検討する。壁垂直方向最大変形量 w_{max} 、および、共振周波数 f_r は、アクチュエータの直径 d と膜厚 h を用いて、それぞれ以下のように表される。

$$w_{max} = \frac{P}{64D} \left(\frac{d}{2}\right)^4 \propto \frac{d^4}{h^3} \quad (3)$$

$$f_r = \frac{4\lambda_n}{d^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \propto \frac{h}{a^2} \quad (4)$$

ただし、 D 、 λ_n はそれぞれ、板の曲げ剛性、振動の固有値である。

本研究で試作したアクチュエータは、前述のように31V/μmの電界に対して、変位約0.16mm、共振周波数は約400Hzである。直径1mmのアクチュエータを考え、式(3)、式(4)が成り立つとすると、壁垂直方向変位0.2mmとなる膜厚は約9μmであり、共振周波数は約1100Hzと見積もられる。また、電界を50V/μmまで印可できるとすれば、それぞれ約12μm、約1500Hzと見積もられる。従って、応答周波数に関してはシリコーンの粘弾性の影響で実際は上記の見積りよりも小さくなると考えられるが、目標値は十分に達成可能であると言える。

5. 結言

乱流能動制御への適用を目的として、電歪ポリマーを動作原理とした壁面変形アクチュエータのプロトタイプを試作し、動作特性の評価を行った。その結果、低い背圧を印可することで静的変位、周波数特性が向上することを示した。また、本研究で想定するアクチュエータの変形量、動特性を十分満たしうることを明らかにした。

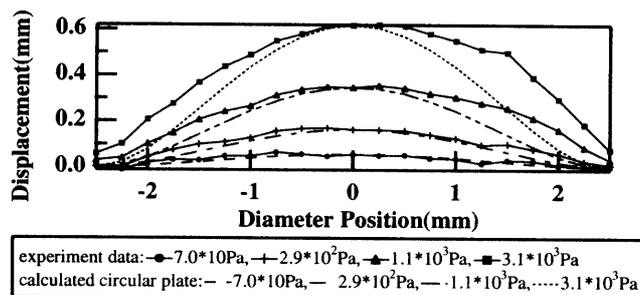


Fig. 5 Deformation of actuator depending on back pressure

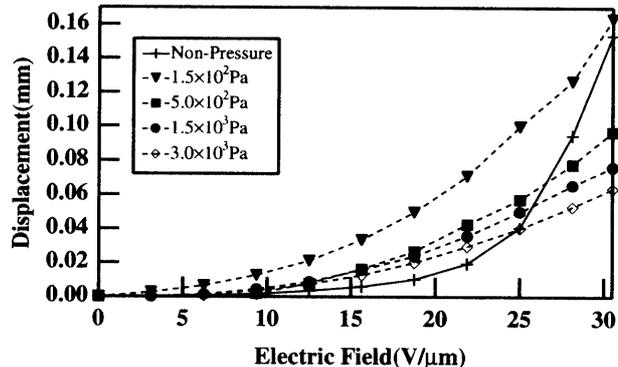


Fig. 6 Static response of actuator

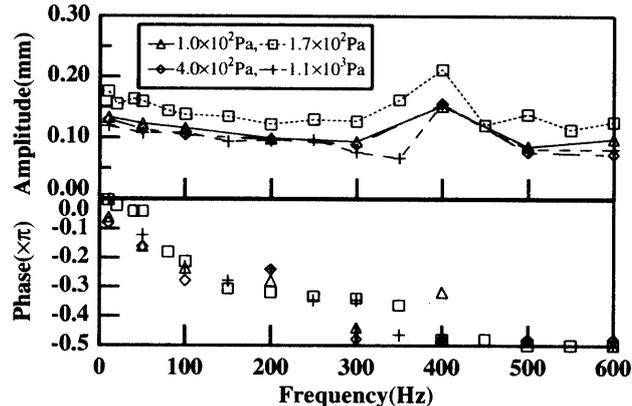


Fig. 7 Dynamic response of actuator

本研究は文部科学省開放的融合研究推進制度の援助を受けた。記して謝意を表す。

引用文献

- 1) T. Bewley, H. Choi, R. Teman, & P. Moin: *CTR Annual Research Breifs*, Stanford University (1993) 3.
- 2) H. Choi, P. Moin, & J. Kim: *J. Fluid Mech.* 262 (1994) 75.
- 3) C. Lee, J. Kim, & H. Choi: *J. Fluid Mech.* 358 (1998) 245.
- 4) B. L. Smith, & A. Glezer: *Phys. Fluids* 10 (1998) 2281.
- 5) S. A. Jacobson, & W. C. Reynolds: *J. Fluid Mech.* 360 (1998) 179.
- 6) C. Liu, T. Tsao, Y.-C. Tai, & C.-M. Ho: *Proc. 9th MEMS Workshop* (1994) 57.
- 7) 鈴木(宏)・笠木・鈴木: *機論*, 65-639, B(1999) 3644.
- 8) C. Grosjean, G. B. Lee, W. Hong, Y.-C. Tai, & C.-M. Ho: *Proc. 11th MEMS Workshop* (1996) 161.
- 9) R. Pelrine, R. Kornbluh, & J. P. Joseph: *Sensors and Actuators A Phys.* 64 (1998) 77.
- 10) R. Pelrine, R. D. Kornbluh, Q. Pei, & J. P. Joseph: *Science*, 287 (2000) 836.
- 11) T. Endo, N. Kasagi, & Y. Suzuki: *Int. J. Heat & Fluid Flow* 21 (2000) 568.
- 12) S. Kang, & H. Choi: *Phys. Fluids* 12 (2000) 3301.