S字型静電駆動フィルムアクチュエータの動作特性 - 雰囲気圧力がフィルム移動速度に及ぼす影響 -

会員 式田 光宏 (名大 工)
 会員 佐藤 一雄 (名大 工)
 非会員 竹下 賢吾 (名大 工)
 会員 鈴木 清光 (日立 日立研)

Propagation speed of an electrostatic S-shaped film actuator related to environmental gas pressure conditions
 Mitsuhiro Shikida, Member, Kazuo Sato, Member, Kengo Takeshita, Non-Member
 (Nagoya University), Seiko Suzuki, Member (Hitachi, Ltd.)

We have experimentally measured the response time of an electrostatic S-shaped film actuator relative to environmental gas pressure and applied voltage aiming at an application to gas valve systems. This actuator has an S-shaped film element whose S-shape propagates in the lateral direction. We measured the propagation speed of the S-bend continuously from start to stop positions by detecting capacitance change between the film and one of the actuator electrode plates. It reached 7 m/s when the pressure was 1 Pa and the applied voltage was 120 V. The response times of the actuator, in which the film travels 5 mm laterally and 2 mm vertically, are 7.7 ms at atmospheric pressure and 2.2 ms at a low pressure of 100 Pa.

Key words: アクチュエータ, 静電気力, マイクロバルブ, 流体機械

1. まえがき

半導体微細加工技術を利用したマイクロマシニング技術は、センサ、アクチュエータ、制御回路等を集積化できるため、知的でミクロなメカニカルシステムを構築すると期待されている。マイクロメカニカルシステムの研究において、マイクロセンサは実用段階にあり、制御回路と一体化した圧力センサ、加速度センサ等の様々なインテリジェントセンサが実用化されている。一方、マイクロメカニカルシステムの一翼を担うアクチュエータの研究は未だ萌芽期にあり、静電気力、電磁気力、ピエゾ素子、熱膨張などの様々な駆動源を用いたマイクロアクチュエータが提案されている⁽¹⁾⁻⁽¹³⁾。これら駆動源のスケーリング効果を考えた場合、静電気力が寸法の2乗に比例するのに対して他の駆動力は3乗に比例する。このため一般にマイクロ化に適した駆動源は静電気力であると言われているが、これまでに報告されている静電気力アクチュエータは、いずれもストロークが100 μm 以下で出力も小さい。このような従来の静電気力アクチュエータを例えばガスバルブに適用すると、ストロークが小さいために低圧ガスでは十分な流量が得られない。

筆者らは数百 μm 以上のストロークを実現する新規な構

造の静電駆動型フィルムアクチュエータを提案しその動作原理を確認している⁽¹⁴⁾。これまでに本アクチュエータの一応用例として大きさ数十 mm のガスバルブを試作し、ガスバルブの動作可能な圧力差は数気圧に達することを明らかにした⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾。またこのような構造を製作するためのマイクロマシニング技術を開発した⁽¹⁸⁾。しかし、本アクチュエータをバルブに適用するにはアクチュエータの応答速度を明らかにする必要がある。高い応答速度を要求されるガスバルブの応用分野の一つに原子層レベルの薄膜形成を行う分子線エピタキシなどの半導体製造装置がある。ここでは薄膜成長に必要な原料ガスを大気圧以下の低圧力で大量に流し、これを高速に切り替える必要がある。

本報告では本アクチュエータを大気圧以下の低圧ガスを扱うガスバルブシステムに適用することを想定して、そのような条件下における本アクチュエータの応答速度を実験的に検討したので以下に報告する。

2. S字型静電駆動フィルムアクチュエータ

S字型静電駆動フィルムアクチュエータの動作原理を図1に示す。アクチュエータは、表面に絶縁膜をもつ一對の平板電極と導電性フィルムからなる。フィルムの中央部は

弾性的にS字形に変形している。S字形状部は上部電極とフィルム間もしくは下部電極とフィルム間で生じる静電気力により左右に移動する。上部電極とフィルム間に電圧を印加した場合、フィルムには距離の2乗に反比例する静電気力が作用する、その結果、フィルムは上部電極に近接した部分を始点として、上部電極との接触面積を増し、S字形状部は右方向に移動する(図1(a))。印加する電圧を上部電極と下部電極の間で交互に切り替えると、フィルムのS字形状部は図1(a)または(b)のように左右に運動する。

本方式のアクチュエータの特徴は以下のとおりである。

- (1) 静電気力で数 μm から数 mm までの大変位を得ることができる。これはフィルムを駆動する静電気力が、電極プレートに近接しているS字形状の立ち上がり部分に常に働くので、アクチュエータの垂直方向の変位に相当する一対の平板電極間隔を大きくしてもフィルムを駆動できるためである。
- (2) 可動部分であるフィルムを高速に駆動することが可能である。これはフィルム移動部分の質量が小さく、また、フィルムのS字形状部分を左右に移動させる場合、両方向とも静電気力で駆動し、弾性的な復元力によらないためである。
- (3) フィルム移動時において摺動部分が無く、摩擦の影響がほとんど存在しない。

上記(1)(2)の特徴は低圧の原料ガスの供給を高速に切替える半導体薄膜製造装置に適しており、また(3)の特徴は半導体を成膜する上で不純物の原因となるパーティクルの発生を抑えるのに有効である。

図1 S字型静電駆動アクチュエータの動作原理図

Fig. 1. Principle of S-shaped actuator.

3. 実験

〈3・1〉実験に用いたアクチュエータ構造 実験に用いたアクチュエータの構造を図2に示す。これはアクチュエータの動作を確認するためのマクロモデルであり、アクチュエータ本体の全体寸法は $76\text{mm} \times 15\text{mm} \times 2.8\text{mm}$ である。導電性フィルムには厚さ $10\mu\text{m}$ 、幅 12mm のステンレス製の圧延金属箔を用いた。平板電極には単結晶 Si ウエハを、また絶縁層にはその表面に形成した厚さ $1.9\mu\text{m}$ の熱酸化膜(SiO_2)を利用した。本アクチュエータではフィルム面が垂直方向に 2mm 、S字形状が横方向に $30 - 33\text{mm}$ 移動する構造になっている。

〈3・2〉S字部の横移動速度測定方法 フィルムS字部の横移動速度を測定する方法を図2を用いて説明する。S字部の横移動速度はフィルムの移動に伴う静電容量の変化から求める。フィルム駆動電圧を上部電極とフィルム間とに印加して、フィルムのS字形状部を右方向に移動させる。この時、導電性フィルムは下部電極側から順次剥がれていく。フィルムと下部電極間とで形成される静電容量はフィルムが下側電極に接している面積に比例する。従ってフィルム動作時のフィルムと下側電極間との間の静電容量を測定すればフィルム動作時におけるS字部の位置を連続的に求めることができる。すなわち静電容量が移動中のフィルムのS字部の位置を示している。

実験では一対の平板電極の片方をフィルム駆動用として用い、もう一方を静電容量測定用として用いた。フィルム駆動用電極には $80 - 220\text{V}$ の直流電圧を印加した。本実験

図2 実験に用いたアクチュエータとフィルムの移動速度測定回路図

Fig. 2. Measurement scheme of film movement.

で用いた静電容量検出回路（図2参照）では、次式に示したようにフィルムと平板電極間の静電容量 C に比例した電圧 (V_o) が出力される。

$$V_o = \frac{C}{C_f} V_i \quad (1)$$

但し、

V_o : 静電容量検出回路の出力電圧

C : フィルムと測定用平板電極間の静電容量

C_f : 検出回路の帰還容量 (10 nF)

V_i : フィルムに加える静電容量検出用入力電圧

(周波数: 100 kHz)

本測定で用いた回路では測定用電極の電位は 0 V であるため、フィルムと測定用電極間には入力信号分の電位が加わる。この結果、フィルムと測定用電極間にも静電気が働いてしまう。実験ではこの測定用入力電圧 (V_i) で生じる静電気がもう一方の駆動用電極で生じる静電気に比べて十分に小さくフィルムの運動に影響を与えないようにする為に、入力信号 (V_i) の大きさを 4 - 6 V に制限し測定用電圧で生じる静電気をフィルム駆動用静電気の 1% 以下にした。また実験ではフィルムの運動に及ぼす雰囲気圧力の効果を明らかにするために、アクチュエータを真空チャンパの中に入れ、雰囲気(空気)圧力を大気圧 (0.1 MPa) から 10 mPa まで変化させた。

〈3・3〉実験結果

〈3・3・1〉静電容量検出回路 本実験で用いる静電容量検出回路の出力電圧はフィルムが平板電極に接触している面積（フィルムと平板電極とで形成される静電容量）に依存する。そこで実験ではまず検出回路の出力電圧がフィルムと平板電極面との接触距離に比例しているかどうかを確認した。実験では短冊状の真直なフィルムを用い、フィルムと平板電極との接触長を変えて静電容量検出回路の出力を測定した。実験結果を図3に示す。図3の結果から検出回路の出力電圧はフィルムの接触長に比例していることが分かる。これにより静電容量検出回路の出力電圧の変化を測定すれば、フィルムの S 字部の位置が分かることが確認された。また、この出力電圧の大きさからフィルムと測定用平板電極間の間隙を求めると、本実験で用いたアクチュエータではフィルムは絶縁膜である SiO_2 表面から平均して約 1 μm 浮いていることが分かった。この原因としてはフィルムとして用いた圧延金属箔の表面粗さや反りが関係していると考えられる。

〈3・3・2〉フィルムの運動 静電容量検出回路の出力波形の一例を図4に示す。静電容量検出に交流信号を用いているので、図4に示した上側半分の波形の包絡線（図中に白線で表示）がフィルム駆動時のフィルムと平板電極間の静電容量変化を示している。図4(a)はフィルムを 0.1 MPa の大気圧下で駆動した場合で、図4(b)は 10 mPa の低圧下で駆動した場合の静電容量変化を示している。図4に示した波形からどちらの場合もフィルム S 字部は最初の

図3 フィルムが検出電極に接触している長さと静電容量検出回路の出力との関係

Fig. 3. Relationship between output voltage of detection circuit and film contact length on the electrode plate (input voltage: 4 V).

短時間は加速度運動をしており、その後等速度で運動していることが分かる。最初の加速時間が短いのはフィルム可動部分の質量が小さいためである。また、フィルムが途中から一定速度(終端速度)で移動するのは主に気体の抵抗とフィルムの変形に伴うフィルム内部のエネルギー損失によるものと考えている。上記の結果より、本アクチュエータの運動を、フィルムを終端速度に到達させるのに要する加速領域と、その後の終端速度領域とに分けて以下に詳しく論じることにする。

(1) 加速領域での運動特性

フィルムを終端速度にするのに要する加速時間に及ぼす駆動電圧及び雰囲気圧力の効果を実験的に検討した。なお、加速時間の定義は図4に示すとおりであり、駆動電圧印加後から検出回路の出力電圧(静電容量)の変化が直線的に減少するまでの時間とした。加速時間とフィルム駆動電圧との関係を図5に示した。図中のパラメータはアクチュエータの雰囲気圧力である。図5のグラフより、加速時間は駆動電圧に依存しており、駆動電圧を高くするほど加速時間が短くなりフィルムを短時間で終端速度にもっていくことができることがわかる。例えば、0.1 MPa の大気圧でフィルムを駆動した場合、フィルムを 140 V で駆動すると 10 ms の加速時間を要するが、220 V で駆動すれば 3 ms の加速時間で終端速度にすることができる。また、図5のグラフよりフィルムの加速時間は雰囲気圧力に依存していることがわかる。そこで駆動電圧を一定とし、雰囲気圧力を変えることにより加速時間がどのように変化するかを調べた。その結果を図6に示した。図中にはフィルムを 120 V の電

(a) Gas pressure: 10^5 Pa.

(b) Gas pressure: 10^{-2} Pa.

図4 フィルムの移動にともなう静電容量検出回路の出力波形の変化

Fig. 4. Measured capacitance change between film and lower electrode (applied voltage: 140 V).

圧で駆動したときの実験結果を示した。図6のグラフより、雰囲気気圧力が0.1 MPaの大気圧下から10 Paまでの領域では加速時間は雰囲気気圧力を低くすると共に短くなるが、それ以下の圧力では雰囲気気圧力に依らず加速時間はほぼ一定になることがわかった。雰囲気気圧力が大気圧であるときはフィルムを終端速度にまでもっていくのに20 msの時間を必要とするが、1 Pa以下にすると2 msの加速時間で終端速度にすることができる。

(2) 終端速度領域での運動特性

アクチュエータの応答速度を求めるにはフィルムが終端速度に達するまでの加速時間の他に、フィルムの終端速度が駆動電圧及び雰囲気気圧力でどのように変化するか把握しておく必要がある。前述の加速時間測定の時と同様に、フィルムの駆動電圧及び雰囲気気圧力を変え、それによりフィルムの終端速度がどのように変化するか調べた。フィルムの終端速度は図4に例示するような出力波形において、

図5 フィルムの加速時間と駆動電圧との関係

Fig. 5. Relationship between acceleration time and applied voltage.

図6 雰囲気気圧力がフィルムの加速時間に及ぼす影響

Fig. 6. Experimental results showing gas pressure dependence of the film acceleration time.

静電容量が直線的に減少している部分の時間軸に対する傾きから算出した。フィルムの終端速度とフィルム駆動電圧との関係を図7に示した。図7のグラフより、終端速度は駆動電圧に依存しており、駆動電圧を高くするほど終端速度が大きくなることがわかる。例えば、0.1 MPaの大気圧でフィルムを駆動した場合、フィルムを140 Vで駆動すると終端速度は0.8 m/sとなり、220 Vで駆動すれば終端速度は2.7 m/sにまで達する。また、一定電圧下における雰囲気気圧力と終端速度との関係を図8に示した。図8のグラフ

より、フィルムの終端速度は雰囲気圧力に依存しており、雰囲気圧力が 0.1 MPa の大気圧下から 10 Pa までの領域では終端速度は雰囲気圧力を低くすると共に大きくなるが、それ以下の圧力では雰囲気圧力に依らず終端速度はほぼ一定になることがわかる。雰囲気が大気圧であるときはフィルムの終端速度は 0.4 m/s であるが、10 Pa 以下にすればフィルムを 7 m/s の高速度で駆動することができる。

本アクチュエータでは、静電気力でフィルムを駆動する際、雰囲気流体からフィルムの移動速度に応じた抗力を受

ける。可動部分の代表寸法が気体分子の平均自由行程よりも十分大きい場合は、いわゆる粘性流モデルが成立する。このような条件が成立する高圧力雰囲気中では気体の粘度は圧力によらず一定であるから終端速度に圧力依存性はないと考える。しかし、雰囲気流体の圧力が低くなり、可動部分の代表寸法が気体分子の平均自由行程と等しくあるいはそれ以下になると、雰囲気圧力の減少とともに流れの状態は粘性流状態から、遷移流状態そして分子流状態へと移行する。遷移流状態⁽¹⁹⁾及び分子流状態では気体の抗力は圧力の減少とともに減少する。実験において、大気圧から 10 Pa までの領域でフィルムの終端速度が雰囲気圧力の減少とともに増加するのは、フィルム運動部分と駆動平板電極間における流れの状態が遷移流状態から分子流状態になっているためであると推測する。本アクチュエータが雰囲気から受ける主な抗力成分は、(1)S 字部前面の気体を押し除けるさいの抗力、(2)S 字の立上り部分と電極間の気体のスクイズ効果、の二つと考える。特にスクイズ効果はフィルム - 電極間の隙間が平均自由行程より小さくなるから、大気圧付近でも遷移流モデルが成立して、圧力依存性を示す原因になり得る。他方、雰囲気圧力に依らず終端速度が一定となる 10 Pa 以下の圧力領域では、気体の流れによる抵抗力は圧力依存性を示すものの、その絶対値が十分に小さいので、気体の抗力よりもフィルム構造体におけるエネルギー損失が終端速度を支配するものと考えられる。

4. アクチュエータの応答時間

上記実験結果より、特に低圧下では可動フィルムは数 ms の加速時間で数 m/s の終端速度に達することが分かった。ここでは、本アクチュエータをガスバルブシステムに適用した際、バルブの応答時間がどの程度になるか求める。アクチュエータの応答時間を求めるために駆動電圧印加後のフィルム移動距離を図 9 に示した。図 9 (a)には雰囲気圧力が大気圧である場合を、また、図 9 (b)には半導体薄膜製造装置の一つである分子線エビタキシ装置で用いられている 100 Pa の低圧の場合を示した。どちらの場合も駆動電圧を高くすることでアクチュエータの応答時間は短くなる。特に低圧下では終端速度が大きくなるので線図の傾きは大気圧より大きくなる。

図 9 より、本アクチュエータは可動フィルム部分を終端速度まで加速するために 5 mm 程度の加速距離が必要であることが分かる。従って、例えばフィルムの移動距離が 5 mm 以下であるようなマイクロアクチュエータ構造では、応答時間はフィルムの加速領域で決定されてしまう。本アクチュエータをフィルム面が垂直方向に 2 mm、横方向に 5 mm 移動するようなマイクロバルブシステムに適用した場合の応答時間を求めると、大気圧下では 7.7 ms となり、100 Pa の低圧下では 2.2 ms になる（駆動電圧が 160 V の場合）。

以上の結果より、本アクチュエータをマイクロ化した場

図 7 フィルムの終端速度と駆動電圧との関係

Fig. 7. Relationship between terminal velocity of the S-bend and applied voltage.

図 8 雰囲気圧力がフィルムの終端速度に及ぼす影響

Fig. 8. Experimental results showing gas pressure dependence of terminal velocity.

(a) Gas pressure: 10^{-5} Pa

(b) Gas pressure: 10^{-2} Pa

図9 駆動電圧印加後のフィルムの横移動距離

Fig. 9. Relationship between time and travel distance of the S-bend.

合には、終端速度に達しないような条件であっても 10 ms 以下の短い応答時間でフィルムを駆動できることがわかる。

5. むすび

フィルムと平板電極間で生じる静電容量変化を検出することで静電気力によるフィルムの加速時間及び終端速度を測定した。また、アクチュエータの雰囲気圧力がフィルムの加速時間及び終端速度に与える影響を明らかにした。本実験で得られた結果を以下に示す。

(1) 静電気力によりフィルム S 字部は先ず加速度的に運動しその後一定速度で運動する。

(2) フィルム S 字部を終端速度にするために要する加速時間は駆動電圧及び雰囲気圧力に依存する。加速時間は駆動電圧の増加及び雰囲気圧力の減少とともに短くなる。但し、雰囲気圧力が 10 Pa 以下では加速時間は一定になる。

(3) フィルム S 字部の終端速度は駆動電圧及び雰囲気圧力に依存する。終端速度は駆動電圧の増加及び雰囲気圧力の減少と共に大きくなる。但し、雰囲気圧力が 10 Pa 以下では終端速度は飽和し一定になる。

(4) 駆動電圧を高くすることによりアクチュエータの応答時間は短くなる。例えばフィルムが横方向に 5 mm 移動するようなマイクロデバイスにおけるフィルムの応答時間は、大気圧下では 7.7 ms となり、100 Pa の低圧下では 2.2 ms となる。以上の結果より、本アクチュエータをマイクロマシニング技術でマイクロ化した場合には、10 ms 以下の短い応答時間をもつマイクロデバイスになる。

本研究の一部は財団法人倉田記念科学技術振興会の援助のもとで行われたものである。ここに感謝の意を表します。

(平成 8 年 3 月 21 日受付, 平成 8 年 6 月 19 日再受付)

文献

- (1) T. Ohnstein, T. Fukiura, J. Ridley, and U. Bonne: "Micromachined Silicon Microvalve", Proc. of IEEE MEMS., 95-98 (1990)
- (2) M. A. Huff, M. S. Mettner, T. A. Lober, and M. A. Schmidt: "A Pressure-Balanced Electrostatically-Activated Microvalve", Tech. Digest of IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 123-127 (1990)
- (3) H. Jerman: "Electrically-Activated Micromachined Diaphragm Valve", Tech. Digest of IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 65-69 (1990)
- (4) F. C. M. Van De Pol, H. T. G. Van Lintel, M. Elwenspoek, and J. H. J. Fluitman: "A Thermopneumatic Micropump Based on Micro-Engineering Techniques", Sensors and Actuators, A21-A23, 198-202 (1990)
- (5) F. C. M. Van De Pol, D. G. J. Wonnink, M. Elwenspoek, and J. H. Fluitman: "Thermo-Pneumatic Actuation Principle for a Microminiature Pump and Other Micromechanical Devices", Sensors and Actuators, 17, 139-143 (1989)
- (6) M. J. Zdeblick, and J. B. Angell: "A Microminiature Electric-to-Fluidic Valve", Tech. Digest of Transducers '87, 827-829 (1987)
- (7) M. Esashi: "Integrated Micro Flow Control Systems", Sensors and Actuators, A21-A23, 161-167 (1990)
- (8) S. Shoji, S. Nakagawa, and M. Esashi: "Micropump and Sample-Injection for Integrated Chemical Analyzing Systems", Sensors and Actuators, A21-A23, 189-192 (1990)

- (9) J. G. Smits: "Piezoelectric Micropump with Three Valves Working Peristaltically", *Sensors and Actuators*, A21-A23, 203-206 (1990)
- (10) H. G. Van Lintel, F. C. M. Van De Pol, and S. Bouwstra: "A Piezoelectric Micropump Based on Micromachining of Silicon", *Sensors and Actuators*, 15, 153-167 (1988)
- (11) F. C. M. Van De Pol: "Micro Liquid-Handling Devices", *Micro System Tech.* '90, 799-805 (1990)
- (12) R. L. Smith, R. W. Bower, and S. D. Collins: "The Design and Fabrication of a Magnetically Actuated Micromachined Flow Valve", *Sensors and Actuators*, A-24, 47-53 (1990)
- (13) K. Yanagisawa, H. Kuwano, and A. Tago: "An Electromagnetically Driven Microvalve", *Tech. Digest of Transducers '93*, 102-105 (1993)
- (14) K. Sato and M. Shikida: "Electrostatic Film Actuator with a Large Vertical Displacement", *Proc. of IEEE MEMS.*, 1-5 (1992)
- (15) M. Shikida, K. Sato, S. Tanaka, Y. Kawamura, and Y. Fujisaki: "Electrostatically Driven Gas Valve with High Conductance", *J. Microelectro-mechanical Systems*, 3, 2, 76-80 (1994)
- (16) K. Sato and M. Shikida: "An Electrostatically Actuated Gas Valve with an S-shaped Film Element", *J. Micromech. Microeng.* 4, 205-209 (1994)
- (17) M. Shikida and K. Sato: "Characteristics of an Electrostatically-driven Gas Valve under High-pressure Conditions", *Proc. of IEEE MEMS* 235-240 (1994)
- (18) M. Shikida, K. Sato, and T. Harada: "Fabrication of an Electrostatic Microactuator with an S-shaped Film", *Proc. of Transducers'95*, 426-429 (1995)
- (19) M. K. Andrews and P. D. Harris: "Damping and Gas Viscosity Measurements Using a Microstructure", *Sensors and Actuators* A49, 103-108 (1995)

竹下 賢吾

(非会員) 1971 年 8 月 26 日生まれ。94 年名古屋大学工学部電子機械工学科卒業。96 年 3 月同大学大学院博士前期課程修了。同年日本電装株式会社入社。主として、静電気力を利用したアクチュエータの研究に従事。

鈴木 清光

(会員) 1942 年 9 月 17 日生まれ。65 年近畿大学理工学部機械工学科卒業。同年(株)日立製作所日立研究所入社。主として酸素センサ、速度センサ、半導体圧力センサ、加速度センサ等の自動車用センサの研究に従事。

式田 光宏

(会員) 1964 年 11 月 23 日生まれ。90 年 3 月成蹊大学大学院修士課程修了。同年から 95 年 2 月まで(株)日立製作所に勤務。現在、名古屋大学工学研究科マイクロシステム工学専攻助手。主としてマイクロアクチュエータとそれを利用したマイクロシステムに関する研究に従事。

佐藤 一雄

(会員) 1948 年 1 月 10 日生まれ。70 年横浜国立大学機械工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。94 年同社退社。同年名古屋大学工学部マイクロシステム工学専攻教授。現在に至る。主としてマイクロマシニング、マイクロアクチュエータの研究に従事。工学博士。