

学術論文

パルス駆動誘導電荷形静電フィルムアクチュエータ

柄川 索^{*1} 新野俊樹^{*2} 橋口俊郎^{*3}

Pulse-driven Induction-type Electrostatic Film Actuator

Saku Egawa^{*1}, Toshiki Niino^{*2} and Toshiro Higuchi^{*3}

A thin electrostatic linear actuator using plastic films has been developed. The film actuator consists of two sheets, a stator embedded with three-phase striped electrodes and a slider coated with a slightly conductive material. First, voltages are applied on the stator electrodes to induce electric charges on the slider. Then, pulse voltages are applied to generate propulsive force and have the slider traverse on the stator. The stator sheet has been fabricated by forming 240[μm] pitched copper lines on a polyimide film and covering them with a polyimide film. As the slider sheet, a 12[μm] PET film coated with mixture of polyurethane and carbon particles has been used. Total thickness and mass are 120[μm] and 0.35[g], respectively. This actuator produced 0.16[N] propulsive force and 1.6[mW] output power at 800[V] driving voltage. The film actuator is expected to be used in variety of applications such as display devices, thin material conveyors, or powerful artificial muscles.

Key Words: Electrostatic Actuator, Plastic Film, Artificial Muscle

1. はじめに

静電アクチュエータは、電荷間のクーロン力をを利用して機械的仕事を発生する装置である。その基本原理は、18世紀から知られており、可変容量形、誘導形、エレクトレット形など様々な方式のアクチュエータが考案され、製作されてきた[1]～[4]。これらの静電アクチュエータは、現在の磁力式モータに類似した寸法・構造を有しており、通常の機械、すなわちセンチメートルオーダー以上の大さきの機械を動かすことを目指して研究が行われていた。しかし、駆動に高電圧が必要な上、磁力式モータに比べて力が弱かったため、実用化されなかった。

静電アクチュエータは、原理的、構造的に小型化に適する性質を持つ。近年になって、超小型の機械の駆動源として、静電アクチュエータが注目されるようになり、IC製作技術を応用して、大きさ0.1[mm]を下回るマイクロアクチュエータの試作が行われている[5]。静電マイクロアクチュエータの成功に刺激され、静電力の利用に対する関心が高まっており、出力の大きい静電アクチュエータの開発を目指す研究も、再び活発に

なりつつある[6]～[10]。

筆者らは1989年に、積層することにより大出力化できる静電フィルムアクチュエータを考案し[19][20]、研究を進めてきた。本研究の目的は、通常の大きさの世界で利用できる、軽量・大出力の実用的な静電アクチュエータを開発することである。

静電力の利点は、力を発生するために要する体積が小さいことにある。磁気モータでは、磁力を得るために大きな体積のコイルが必要であるのに対し、静電力は薄い平面状の電極のみで発生できる。この利点を生かし、静電力の能力を引き出せば、実用的な力を発生することが可能となる。

従来の通常寸法の静電アクチュエータが、実用的な性能を發揮できなかった原因是、静電力の特性が生かされていなかったためである。従来型の多くは、太い円筒形ロータの回りに電極を配置した磁気モータに類似した構造を用いていた。この構造では駆動力はロータ表面でのみ発生し、円筒内部の体積は力発生に寄与しない。通常の寸法の領域では、単位面積当たりの静電力は磁力よりも弱いため[2]、磁気モータと同様の構造では、磁気モータよりも小さい出力しか得られない。

静電力の長所を生かすには、アクチュエータをフィルム化することが最も有効と考えられる。あるいは両方に電極を持つ2枚の薄いフィルムを重ね合わせ、向き合う面で滑り合う方向の静電力を発生させる。この構造を用いれば、超薄型で柔軟な、従来と異なった形態・機能のアクチュエータが製作できる。ま

原稿受付 1995年11月29日

*1(株)日立製作所

*2理化学研究所

*3東京大学工学部

*1Hitachi, Ltd.

*2The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

*3Faculty of Engineering, University of Tokyo

た、フィルムを大面積化すれば大きな力が得られる。さらに、体積当たりの力が大きいため、多数のフィルムを積層し、力を足し合わせれば、同じ体積の従来の磁気モータを凌駕する大出力が得られる可能性がある。

しかし、薄い材料は変形しやすく寸法精度が低いこと、フィルム間の摺動面で大きな摩擦が生じること等の問題があり、従来方式の静電アクチュエータをフィルム化するのは困難である。そこで、帯状電極の上で抵抗体を駆動する、パルス駆動誘導電荷形駆動方式を考案した。この方式は、アクチュエータの構造が単純で製作が容易であり、また、固定子・移動子間に反発力が発生するため摩擦が小さく、フィルム化に適している。本アクチュエータは、フィルムを積層した強力な静電人工筋[11][12]、紙や薄い材料の搬送・位置決め[13][14]、透明にできることを利用した表示素子[15]、などへの応用が期待される。

本論文では、電極ピッチ 1.27[mm]および 0.24[mm]のアクチュエータの試作例と実験結果を示す。また、アクチュエータの設計パラメータが特性に及ぼす影響を考察し、設計指針を示す。

2. 動作原理

2.1 構造

本静電アクチュエータは、固定子・移動子の 2 枚のフィルムからなる。Fig. 1 に示すように、固定子は 3 相に配線された多数の帯状の電極を持つ。電極の表面は絶縁膜で覆われている。移動子は微弱な導電性を有する抵抗体層を持つ。移動子には齒状の構造はなく、面の広がり方向には均質である。移動子を固定子の上に置き、電極に正負の電圧を印加することにより、移動子を固定子に対し滑るように動かす。以下に示すように、二段駆動法と一段駆動法の 2 種類の駆動法があるが、いずれも初めに移動子に電荷を誘導し、その電荷を利用して駆動力を発生する。

2.2 二段駆動法

まず、(1) 初期充電を行い、移動子に電荷を蓄積する。その後、(2) 駆動と(3) 再充電を繰り返し行い、移動子をステップ状に駆動する。

(1) 初期充電 初め、移動子は電荷を持たない。まず Fig. 1(1a) に示すように、固定子電極に (+, -, 0) の電圧を印加し、移動子上に電極と逆極性の電荷を誘導する。これにより、固定子電極のパターンが、電荷のパターンとして移動子上に転写される。充電を要する時間 τ は、固定子・移動子間の容量と抵抗体層の抵抗率で定まり、後述する試作装置の場合、1 秒程度となっている。充電が完了した時点 (Fig. 1(1b)) では、移動子は垂直下向きに吸引され、摩擦により強く保持されている。

(2) 駆動 Fig. 1(2a) のように、電圧を (-, +, -) に切り替える。これにより電極の電荷は瞬時に入れ替わるが、移動子の電荷配置が新たな平衡状態に変化するには、初期充電と同じく τ 程度の時間を要するため、切り替えの直後は移動子の電荷が保持されており、Fig. 1(2a) の電荷配置が現れる。この時、移動子の電荷とその直下の電極の電荷は同符号となるため、浮上力が発生する。また、第 3 の電極電位を反転し、電圧を (-, +, +) とすると、逆に左向きに駆動できる。

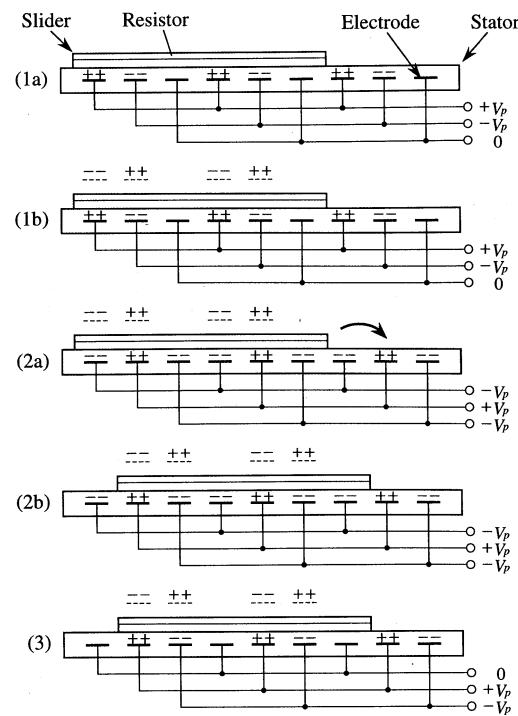


Fig. 1 Operating principle (two-stage method)

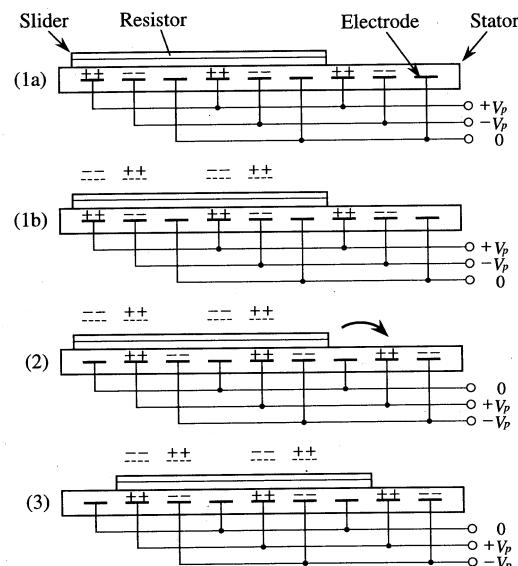


Fig. 2 Operating principle (one-stage method)

右に動く。移動子は、ほぼ電極 1 ピッチ分の距離を動き、停止する (Fig. 1(2b))。電圧を切り替えてから t_a 後に再充電に移る。なお、第 3 の電極電位を反転し、電圧を (-, +, +) とすると、逆に左向きに駆動できる。

(3) 再充電 駆動中に移動子の電荷が失われるため、連続して駆動すると、力が減少する。そこで、移動子が静止した状態で、Fig. 1(3) のように電極を 1 相ずらして正負の電圧を印加し、再充電を行う。失われる電荷は全体の一部なので、再充電の時間 t_c は初期充電時間 τ よりも短くて良い。ただし、十分な電荷量を維持するために、 t_c は駆動時間 t_a よりも長く

する必要がある。実験では、 $t_c : t_a = 4 : 1$ とした。

この後、電圧を印加する電極を1相ずつずらし、(2)、(3)を繰り返す。なお、 $t_p = t_c + t_a$ を駆動パルス周期、その逆数を駆動パルス周波数と呼ぶ。

2.3 一段駆動法

二段駆動では、(+, -, 0), (-, +, -)の2種の電圧パターンを、相をずらしつつ交互に印加するが、前者の電圧パターンのみを用いてもほぼ同様に駆動できる。Fig. 2に駆動方法を示す。

(1) 初期充電 二段駆動と同様に(+, -, 0)の電圧を印加し、移動子に電荷を誘導する。

(2) 駆動 電極を1相ずらし、電圧を(0, +, -)に切り替える。これにより、二段駆動の場合と同様に駆動力と浮上力が発生し、移動子が動く。

(3) 再充電 移動子が停止した後にそのまま電圧を保持し、再充電を行う。

Fig. 1(2a)とFig. 2(2)を比較すると、二段駆動法では、駆動時に第1および第2の電極に移動子と同符号の電荷が現れるのに対して、一段駆動法では、第1電極に大きな電荷が現れない。このため、一段駆動法の方が浮上力が弱く、摩擦の影響を受けやすい。しかし、第1電極の電荷が小さい分、第3電極に現れる電荷が大きく、駆動力が強くなるので、摩擦係数が小さい場合には、一段駆動法の方が有利となる。また、一段駆動法は1周期ごとの電圧切り替え回数が少ないので、高速駆動に適する。

2.4 本アクチュエータの特徴

パルス駆動誘導電荷形アクチュエータは以下の特徴を持つ。

(1) 移動子は、電極等の歯状の構造を持たず、駆動に必要な電荷パターンは、充電操作により固定子から転写される。このため、電極ピッチに誤差がある場合にも動作でき、電極製作に高精度が要求されない。また、固定子・移動子間の位置・角度合わせが不要であり、組み立てが容易である。

(2) 駆動時に、静電反発力により摩擦が減少するため、ペアリング等の機構が不要で、構造が単純化できる。また、反対に静止時には垂直吸引力により摩擦が発生し、強い保持力が得られる。

(3) 移動子に電極が無いので、移動側に配線が不要である。また、移動子質量が小さいので、応答速度を速くできる。

(4) 構造が単純で、高い製作精度を要求しないため、樹脂フィルム等を基板に用いることができ、薄型化が容易である。大面積や曲面などの特殊形状も製作可能である。

(5) 製作・組み立ての手間が小さいため、積層化が容易であり、多数のフィルムアクチュエータを束ねた構造を持つ静電人工筋[11][12]の構成要素として用いることができる。

3. 試作と実験

3.1 拡大モデルによる試験

動作原理の確認のために、電極ピッチ1.27[mm]の拡大モデルを製作した。Fig. 3に断面を示す。

固定子基板にはガラスエポキシ板を用いた。基板上の銅箔にエッティングを施して帯状電極を形成し、その上に厚さ100[μm]のPET(ポリエチレンテレフタレート)フィルムをエポキ

シ樹脂により接着した。移動子には厚さ25[μm]のPETフィルムを用いた。表面に帶電防止剤を塗布し、表面抵抗率を約 $10^{14}[\Omega]$ に調製した。固定子・移動子間に、間隔調整のため100[μm]のPETフィルムを挿入した。

正負一対の直流高圧電源を使用し、出力を半導体リレーで切り替えることにより、駆動に必要な3状態(0, 正, 負)の3相パルス電圧を生成した。基板の外に3相の給電線を設け、各電極に配線した。固定子電極の絶縁耐圧は、±800[V](相間1600[V])であった。

駆動電圧を $V_p=800[V]$ とし、約5[s]の初期充電の後、 $t_c=0.8[s]$, $t_a=0.2[s]$ の駆動パルスを印加したところ、移動子フィルムが動くことが確認された。移動子に重りを取り付け、引き上げさせることにより、推力を測定した。力発生に有効な対面積が120[mm]×50[mm]の時、0.012[N]の推力が得られた。

間隔調整フィルムの厚さを変えることにより、電極と抵抗体の間の距離 h_{ER} を変化させて、推力を測定した。電極ピッチ p に対する h_{ER} の比と推力の関係をFig. 4に示す。推力は、 $h_{ER}=0.2p$ 付近で最大となっており、電極-抵抗体間距離には最適値が存在することが分かる。この現象については4.3節にて論じる。

3.2 フィルムアクチュエータの製作

電極ピッチを240[μm]に縮小したアクチュエータを製作した。Fig. 5, 6に概形と断面図を示す。固定子・移動子の質量は、それぞれ、0.32[g], 0.03[g]である。

固定子フィルムには、電子回路配線用として用いられているフレキシブルプリント回路板を利用した。ポリイミドフィルム上の銅箔に、エッティングにより240[μm]ピッチの電極を形成し、その上にエポキシ樹脂を用いてポリイミドフィルムを接着

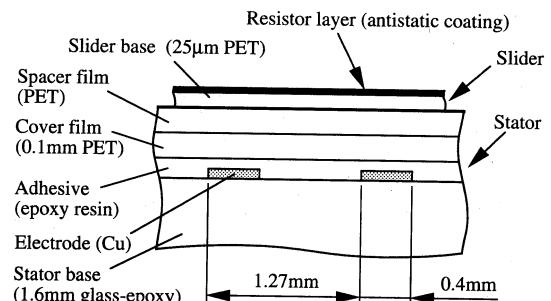


Fig. 3 Cross section of 1.27[mm] pitched magnified model

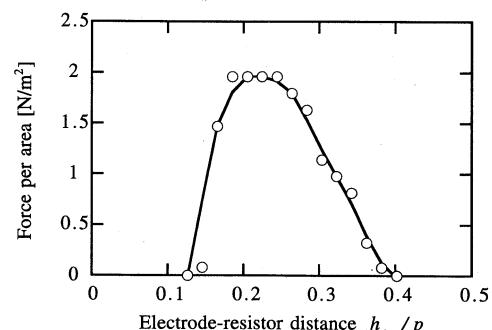
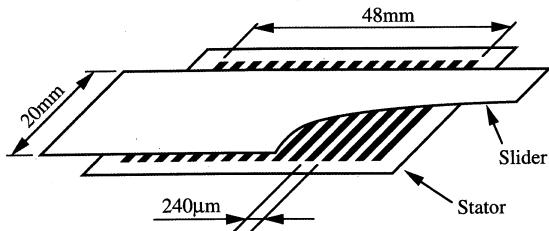
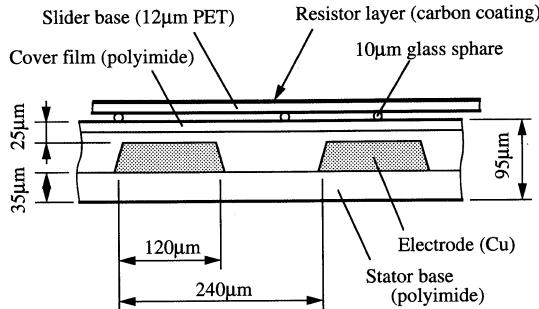


Fig. 4 Influence of film thickness on propulsive force examined using 1.27[mm] pitched magnified model

Fig. 5 Structure of 240[μm] pitched film actuatorFig. 6 Cross section of 240[μm] pitched film actuator

した。3相の駆動電圧を各電極に供給するには、配線の交差が必要となるため、給電線のうち2相は表面で各電極に接続し、残りの1相は裏面からスルーホールを通じて接続した。

移動子フィルムには、厚さ12[μm]のPETを用いた。抵抗体層としてカーボンブラックとポリウレタンの混合物を塗布し、表面抵抗率を約 $10^{14}[\Omega]$ に調製した。

固定子フィルムには、製作工程により生じたと見られる若干の反りがあったが、移動子フィルムが柔軟なため、両フィルムは反りに沿って密着し、問題は生じなかった。

4.1節で述べるように、移動子の表面抵抗率は $10^{12}\sim10^{15}[\Omega]$ に設定する必要がある。しかし、このような高い抵抗率の材料は、温度・湿度の影響を受けやすく、精度良く製作するのは困難である。耐環境性の高い、安定した高抵抗率材料の開発は、本アクチュエータを実現する上での重要な課題の一つである。

ここで使用した材料は、三菱化成(株)により製作された。カーボンブラックとバインダーのポリウレタン樹脂の混合比および塗布厚を調整する事により、抵抗率を制御する[16]。温度・湿度による抵抗率の変動は、室内環境では1桁以内であり、実験上は十分な安定性を有する。

移動子を固定子上に直接に接触させると、摩擦により外部に取り出せる推力が低下する。そこで、固定子・移動子間に直径10[μm]のガラス粒子((株)ユニオン製)を挿入した。少量のガラス粒子をフィルム上にまき、刷毛でフィルム全面に付着させた。顕微鏡観察によると、付着している粒子数は1[mm^2]当たり約10~100個である。

また、空気の絶縁破壊によるフィルムの帯電を防ぐため、隙間をフッ素系絶縁性液体(パーフルオロカーボン、商品名: Fluorinert FC-77(3M社))で満たした。強い推力を必要としない場合は、ガラス粒子と絶縁液を省くことができる。

3.3 駆動実験

製作した固定子電極の耐圧は、 $V_p=800[\text{V}]$ (相間電位差

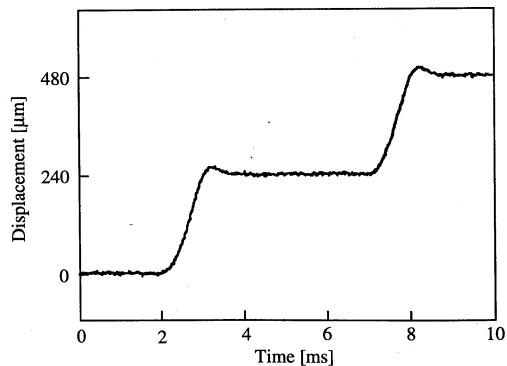


Fig. 7 Motion of slider driven at 5[ms] pulse rate

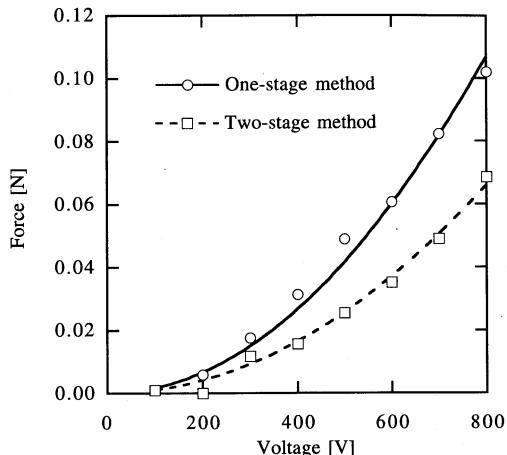


Fig. 8 Propulsive force v.s. driving voltage for two driving methods

1600[V])であった。これを越えると、カバーフィルムの接着材層内で絶縁破壊が起こった。

初期充電約1[s]、印加電圧 $V_p=350[\text{V}]$ 、駆動周期 $t_p=5[\text{ms}]$ とし、一段駆動法で駆動した場合の移動子の動きの例をFig. 7に示す。光電管式変位計(Zimmer社 Model 200)を用いて測定した。ほぼ電極ピッチずつ、階段状に動作していることが確認できる。

アクチュエータの推力の測定は、移動子に糸を取り付け、分銅を引き上げさせることにより行った。Fig. 8に、2種の駆動方法に対する電圧と力の関係を示す。駆動周期 $t_p=0.1[\text{s}]$ とし、二段駆動法の場合は $t_c=0.08[\text{s}]$ 、 $t_a=0.02[\text{s}]$ とした。力はほぼ電圧の2乗に比例している。本装置では、一段駆動法は二段駆動より力が強い。そこで、以下の実験では一段駆動法を用いた。

絶縁液、ガラス粒子の有無による推力の違いをFig. 9に示す。600[V]以下では液の有無による差は小さかった。しかし、液中では、800[V]まで安定して動作したのに対し、空気中では、駆動電圧が600[V]を越えると摩擦が増加し、力が低下した。固定子・移動子間に空気中で放電が起り、フィルム表面が帯電したためと考えられる。

粒子の有無による力の差は、低電圧時には少なかった。これは、固定子・移動子が完全に密着せず、摩擦が小さかつたため

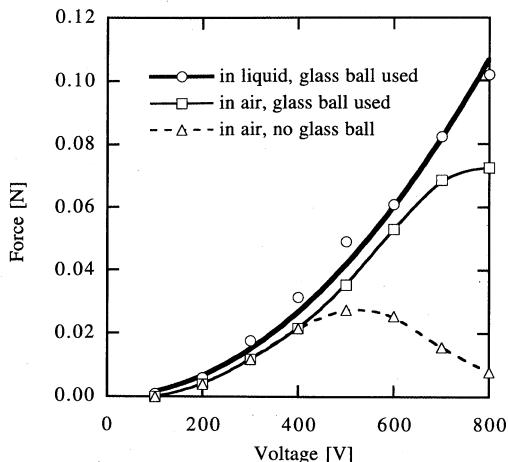


Fig. 9 Effect of dielectric liquid and glass spheres

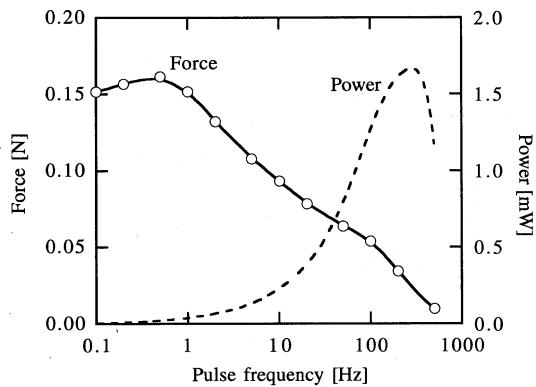


Fig. 10 Force and power v. s. driving frequency

と考えられる。電圧が高くなると粒子が無い場合には摩擦が増加し、力が低下する。絶縁液を用い、ガラス粒子を省いた場合には、移動子は動かなかった。フィルム間の絶縁液の層が薄くなり、流体抵抗が増大したためと考えられる。

駆動パルス周波数に対する力とパワーの変化を Fig. 10 に示す。周波数が低い方が力が強い。1[kHz]以上では脱調して動かなかった。周波数を高めると力が低下する原因是、ステップ毎の再充電が不足して誘導電荷が減少したためと考えられる。パワーは 200[Hz]付近で最大となり、1.7[mW]が得られた。

アクチュエータの諸元および性能を Table 1 にまとめる。

4. 設 計 法

誘導電荷形アクチュエータの設計パラメータがアクチュエータの特性に及ぼす影響について考察し、設計の指針を示す。

以下では、まず、各パラメータを自由に設定できるとした場合の、理想的な設計について論じる。実際に製作する場合には、材料や製作技術上の制約を考慮する必要があるが、それに関しては 4.5 節にて述べる。

4.1 移動子抵抗率の設定

抵抗体層の抵抗率によって、移動子電荷の充放電時定数 τ が定まる。駆動時に電荷を保持するために、 τ は十分に大きい必要があるが、 τ が増えると初期充電に要する時間が長くなる。このため、抵抗率には適切な範囲がある。ここでは、簡略

Table 1 Characteristics of film actuator

Electrode Pitch	0.24[mm]
Effective Area	20[mm] × 48[mm]
Stator Mass	0.32[g]
Slider Mass	0.03[g]
Driving Voltage	800[V]
Max. Force	0.15[N]
Max. Velocity	120[mm/s]
Max. Power	1.7[mW]
Force / Area	150[N/m ²]
Force / Mass	430[N/kg]
Power / Mass	5[W/kg]

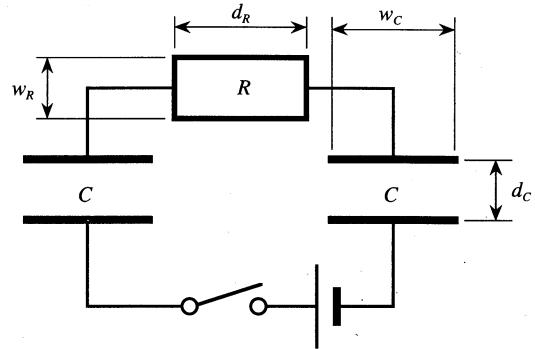


Fig. 11 Model for time constant calculation

化したモデルにより、適性抵抗率を概算する。

抵抗率と時定数の関係を求めるために、Fig. 11 のモデルを用いる。2 個のコンデンサ C の下部電極は一対の固定子電極を表し、 w_c は電極幅に対応する。抵抗 R は移動子抵抗体を表し、 w_r は抵抗体の厚さに対応する。抵抗体の幅 d_r は電極ピッチ p に等しいと見なす。移動子の電荷は、コンデンサ C の上部電極に蓄積されているものとして扱う。実際には、電荷は抵抗体内に分布しているので、電極-電荷間距離 d_c は電極-抵抗体間距離 h_{ER} よりも大きいと見なす。

奥行き方向の長さを L 、誘電率を ϵ 、体積抵抗率を ρ_v とすると、容量および抵抗値は次式で表される。

$$C = \epsilon \frac{w_c L}{d_c} \quad (1)$$

$$R = \rho_v \frac{d_r}{w_r L} \quad (2)$$

よって、この回路の時定数 τ は

$$\tau = \frac{C}{2} R = \epsilon \rho_v \frac{w_c d_r}{2 d_c w_r} \quad (3)$$

となる。代表的な値として、

$$w_c = 0.5p, d_c = 0.25p, w_r = 0.1p, d_r = p \quad (4)$$

と仮定し、式(3)に代入すると、体積抵抗率と時定数の関係が得られる。

$$\tau = 10 \epsilon \rho_v \quad (5)$$

抵抗体層が薄い塗布膜の場合、抵抗の評価には表面抵抗率 ρ_s が用いられる。この場合、抵抗値は次で表される。

$$R = \rho_s \frac{d_r}{L} \quad (6)$$

式(1)、(4)、(6)を式(3)に代入すると、表面抵抗率と時定数の関係が得られる。

$$\tau = \epsilon \rho_s p \quad (7)$$

移動子の運動時間を t_m とすると、時定数 τ は t_m より十分大きい必要がある。また、初期充電に使用できる許容時間 t_0 とすると、 $\tau < t_0$ が要求される。よって、適当な倍率 α に対し、

$$\alpha t_m < \tau < t_0 \quad (8)$$

が必要条件となる。よって、式(5), (7), (8)より、抵抗率の条件が次のように求められる。

$$\frac{\alpha t_m}{10\epsilon} < \rho_s < \frac{t_0}{10\epsilon} \quad (9)$$

あるいは、

$$\frac{\alpha t_m}{\epsilon h} < \rho_s < \frac{t_0}{\epsilon h} \quad (10)$$

例えば、試作装置の場合、 $p=240[\mu\text{m}]$, $t_m=1[\text{ms}]$ である。 $\alpha=10$, $t_0=1[\text{s}]$, $\epsilon=10^{-11}[\text{C/Vm}]$ とすると、式(10)より、抵抗膜の表面抵抗率の条件は、

$$4 \times 10^{12} < \rho_s < 4 \times 10^{14} [\Omega] \quad (11)$$

となる。これは、日常的には絶縁体と見なされるほどの極めて大きい抵抗である。例えば、若干吸湿した回路基板や、良く乾燥された紙がこの範囲に属する。試作装置の移動子は約 $10^{14} [\Omega]$ であり、条件を満たしている。

4.2 電極ピッチの設定

アクチュエータの内部構造の細かさを表す代表寸法として電極ピッチ h を用い、電極ピッチの変化が力・パワーに及ぼす影響を考察する。

本アクチュエータは、電極 3 本からなる単位アクチュエータが繰り返された構造を持つ。単位アクチュエータの力 f_u は、固定子・移動子界面上で、電界の作る Maxwell 応力を積分することにより求められる。電極長を L とすると積分領域の面積は $s_u=3pL$ となる。

電界の大きさ・向きは、電極の形状や材料の誘電率の影響を受けて、場所により複雑に変化するが、取り扱いを容易にするために、電界の大きさの代表値 E_0 を導入する。印加電圧 V に対して電界の大きさは V/p に比例するので、ここでは $E_0=V/p$ と定義する。

場所による電界の変化に対応して Maxwell 応力も変化するが、その大きさは代表電界 E_0 に対する Maxwell 応力の大きさ $(1/2)\epsilon_0 E_0^2$ に比例する。したがって、単位アクチュエータの力 f_u は応力 $(1/2)\epsilon_0 E_0^2$ と、積分領域の面積 s_u の積に比例する。すなわち、次式が成り立つ。

$$f_u = k \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 \cdot s_u = \frac{3}{2} k \epsilon_0 V^2 L / p \quad (12)$$

ここで、 k は無次元の係数であり、電界の分布の形により定まる。アクチュエータの構造寸法比や、材料の比誘電率が力に及ぼす影響は全て k に含まれる。

アクチュエータの幅を W とすると、全体は $(W/3p)$ 個の単位を含むので、全体の駆動力は、

$$F = (W/3p) f_u = \frac{1}{2} k \epsilon_0 S V^2 / p^2 \quad (13)$$

となる。ここで、 S は全体の面積($=WL$)である。全体の力は S に比例しており、単位面積当たりの力 F_s は次式で表される。

$$F_s = F/S = \frac{1}{2} k \epsilon_0 V^2 / p^2 \quad (14)$$

ここで、寸法比を保ちつつ、構造を縮小した時の影響を考える。形状が一定ならば k は定数となるので、

$$F_s \propto V^2 / p^2 = E_0^2 \quad (15)$$

という比例関係がある。すなわち、面積当たりの力は電界によって定まる。この関係から、電極ピッチの及ぼす影響として以下を導くことができる。

(1) 駆動力への影響 最大の駆動力は、材料が絶縁破壊しない範囲で電圧を最大限に印加した時に得られる。絶縁破壊電圧が電極間距離に比例すると仮定すると、最大電圧における電界は一定となるため、電極ピッチによって駆動力は変化しない。すなわち、式(15)より、

$$F_s \propto E_0^2 \propto p^6 \quad (16)$$

ただし、多くの絶縁材料は、電極間距離が近づくにつれて絶縁破壊の生じる電界が上昇する性質を有するため、ピッチを狭めると電界を強めることができ、力を増すことができる。

(2) 駆動電圧への影響 電界 E_0 が一定の場合、力は電極ピッチによらないが、駆動電圧は電極ピッチに比例する。

$$V \propto p \quad (17)$$

すなわち、ピッチを狭めると、力を変化させずに駆動電圧を上げることができる。

(3) 力密度への影響 電極と抵抗体の周囲の電界は、下に広がりを持っており、アクチュエータ外部の物体との電的な干渉を避けるために、強い電界の存在する空間は、アクチュエータが占有する必要がある。この空間の高さがアクチュエータの最小厚さとなる。

電極ピッチ h が狭くなると、電界の広がりが小さくなるため、アクチュエータを薄型化できる。必要となる厚さを h すると、 h は p に比例するので、 E_0 一定と仮定すると、(16)より単位体積当たりの力 F_v は、

$$F_v = F_s / h \propto p^{-1} \quad (18)$$

となる。すなわち、ピッチを狭めると力密度が増加する。

フィルムアクチュエータを積層して用いる場合には、この質が有効に働く。積層アクチュエータ全体の外形寸法を一定とした場合、1 層当たりの力は電極ピッチによらないが、ピッチを狭めると積層数を増やすことができため、全体の力密度発生力が増える。

(4) パワーへの影響 パワーはアクチュエータの駆動と動作速度の積により決まるが、速度は摩擦や駆動回路の能に影響されるため、正確に見積もるのは困難である。ここでは、簡単のため、摩擦を無視し、駆動力 F は位置によらず定として計算する。

質量 M の移動子が力 F を受けて静止状態から 1 ピッチ分距離 p を動くのに要する時間 t_m は、

$$t_m = \sqrt{2pM/F} \quad (19)$$

で表される。移動子の比重を ρ_m 、厚さを h_m とすると、

$$M = \rho_m Sh_m \quad (20)$$

の関係があるので、式(19), (20)より、平均速度 v は次式表される。

$$v = p/t_m = \sqrt{\frac{Fp}{2\rho_m Sh_m}} = \sqrt{\frac{F_s p}{2\rho_m h_m}} \quad (21)$$

移動子に必要な最小の厚さはピッチに比例するから、 $h_m \propto p$

仮定すると、式(21)から、

$$v \propto F_s^{1/2} \quad (22)$$

が導かれる。これに式(15)を代入すると、電界一定の場合、

$$v \propto E_0 \propto p^0 \quad (23)$$

の関係が得られる。すなわち、速度はピッチによらない。

この結果と式(15)から、面積および体積当たりのパワーとピッチの関係が以下のように求められる。

$$P_s = F_s v \propto E_0^3 \propto p^0 \quad (24)$$

$$P_v = P_s / h \propto E_0^3 / p \propto p^{-1} \quad (25)$$

パワー・面積比はピッチによらないが、パワー・体積比はピッチが狭まると p に反比例して増加する。

以上のように、ピッチを縮小することは、駆動電圧・力・パワーの面で有利である。また、位置決め分解能も向上する。したがって、製作技術の許す範囲でピッチは微細化する方が良いと言える。

4.3 電極-抵抗体間距離の設定

3.1節にて示したように、固定子電極から移動子抵抗体までの距離 h_{ER} と電極ピッチ p の比には最適値が存在し、 $h_{ER}=0.2p$ 付近で推力が最大となる。

この原因は定性的には以下のように考えられる。抵抗体を電極に近づけるほど、抵抗体に充電される電荷量が増え、駆動力が増す。しかし、近づけ過ぎると、「駆動」段階において、抵抗体上の電荷が電極に逆符号の電荷を誘導して、固定子・移動子間に垂直吸引力が発生する。吸引力が発生すると摩擦が生じ、外部に取り出せる推力が低下する。

数値計算[17]でも同様の結果が得られており、 $h_{ER}/p=0.2$ の時に推力が最大となる。

4.4 誘電率の設定

Maxwell 応力が $(1/2)\epsilon E^2$ で表されることから明らかなように、系全体の誘電率を増せば、それに比例して力が増加する。しかし、固定子フィルム、移動子フィルム、絶縁液などアクチュエータの構成要素の一部のみの誘電率を変化させた場合の力の変化は単純ではない。正確には数値計算により評価する必要があるが[17]、定性的には下記のように考えられる。

(1) フィルム誘電率 固定子・移動子フィルムの絶縁層の誘電率を増すことには、絶縁層の見かけの厚さを減らす効果がある。材料や製作技術の制約のため絶縁層を薄くできず、電極-抵抗体間距離 h_{ER} が最適距離よりも大きくなる場合には、誘電率を増すことが有効である。ただし、誘電体は電荷に引き寄せられるため、誘電率を増すとフィルム間に吸引力が発生し、摩擦が増加するという負の効果もある。

(2) 絶縁液誘電率 フィルム間の吸引力は、フィルム間の空隙を満たす絶縁液の誘電率を増すと緩和される。誘電体が吸引されるのは、誘電体が近づくと静電容量が増加するためであるが、空隙の誘電率が大きければこの効果は減少する。すなわち、絶縁液の誘電率を高めることには、吸引力を低減し、摩擦を小さくする効果がある。

4.5 実際のアクチュエータとの関係

上記では理想的な設計指針を述べたが、実際には、利用できる材料や製作技術による制約を受ける。以下、参考として、実際に製作する際に考慮すべき事項を述べる。

(1) 抵抗率 移動子の抵抗率を式(11)の下限に近づければ初期充電時間を短縮できる。しかし、試作装置では上限に近い $10^{14}[\Omega]$ とした。これは、高抵抗体の抵抗率を高精度に設定するのが困難なためである。抵抗率が高すぎる場合には初期充電時間を長くすれば駆動できるが、低すぎる場合には電荷が保持できないため動作しない。このため、抵抗率を上限近くに設定する方が安定な動作が得られる。

(2) 電極ピッチ 現在の技術でピッチ $100[\mu\text{m}]$ の電極も製作可能[18]であるが、本論文の試作ではピッチを $240[\mu\text{m}]$ とした。理論上はピッチが小さい方が望ましいが、加工技術の限界近くまで縮小するのは、必ずしも有利ではない。相対的な形状精度が悪化し、絶縁破壊の生じる電界が低下することや、電極抵抗体間距離とピッチの比を適切に設定することが困難となること等の問題が生じるからである。また、材料強度の制約からフィルムに最小限必要な厚さがあるので、式(18)に示した力密度と電極ピッチの反比例関係には限界がある。さらに、同じ速度を得るために駆動周波数はピッチに反比例するため、高速の駆動回路が必要となり、回路内の損失が増大する。電極ピッチは、これらの技術上の制約を勘案して定める必要がある。

(3) 電極-抵抗体間距離 試作装置では $h_{ER}/p \approx 0.2$ であり、最適に近いが、将来的には、電極ピッチの縮小に合わせて電極-抵抗体間距離を近づける必要がある。このために、固定子・移動子の絶縁層を薄くし、かつ、フィルムの密着性を高めるために、反りを減らす必要がある。また、現在は固定子・移動子間にガラス粒子の直径の $10[\mu\text{m}]$ の隙間が存在するが、これを狭めることが求められる。

(4) 誘電率 フィルムの誘電率に関しては、現状では電極-抵抗体間距離が最適に近いため、高誘電率材料を使用する効果は小さいと考えられる。試作装置では、絶縁強度、機械強度、製作プロセスへの適合性から、ポリイミド(比誘電率 $\epsilon_s=3.5$)と PET($\epsilon_s=3.2$)を用いた。ただし、将来電極ピッチを縮小する際には、見かけの厚さを減らすために誘電率の大きい材料である PVDF($\epsilon_s=11$)を使用することも考えられる。

絶縁液の誘電率は大きいほど良いと考えられるが、絶縁液を選定する際には、絶縁性や粘性等も考慮する必要がある。本論文で使用した Fluorinert は、比誘電率は $\epsilon_s=1.86$ と比較的小さいが、絶縁抵抗が高く粘性が低い点で優れている。比誘電率は、シリコンオイル($\epsilon_s=2.5$)やエステル油($\epsilon_s=4$)の方が大きいが、低粘度品には引火性があることが問題である。

5. おわりに

高抵抗体フィルムに誘導される電荷を利用した、パルス駆動誘導電荷形静電フィルムアクチュエータの試作例と実験結果を示した。電極ピッチ $240[\mu\text{m}]$ のフィルムアクチュエータは重量 $0.35[\text{g}]$ 、電極部有効面積 $20[\text{mm}] \times 48[\text{mm}]$ であり、土 $800[\text{V}]$ 印加時に、最大で推力 $0.16[\text{N}]$ 、パワー $1.6[\text{mW}]$ を発生した。推力は自重の 45 倍であり、力重量比では、磁気リニアモータを上回る。

また、アクチュエータの設計法を検討し、電極ピッチを狭める方が有利であること、フィルム厚さには最適値があること、絶縁液の誘電率を高めることが有効であることを示した。

フィルムアクチュエータは、超薄型・軽量・高力重量比を特徴とし、薄物搬送や表示素子などの薄さを生かした用途から、フィルムを積層した静電人工筋といった大出力アクチュエータまで、幅広い分野での利用が期待される。

今後、フィルムアクチュエータの実用性を高めるには、以下が重要である。

(1) 絶縁強度の向上 印加電圧は、固定子材料の絶縁破壊により制限されている。力は電圧の2乗に比例するので、材料の絶縁強度が改善されれば、大幅な力の向上が望める。

(2) 電極ピッチの縮小 駆動電圧の低減と出力の向上の点で、電極ピッチを縮小することが有効である。そのためには、フィルム上に微細な電極を高精度に形成する技術が必要である。また、寸法比を適切に保つため、絶縁膜とフィルム間隙を薄くすると共に、フィルムの反りを減らし、固定子・移動子の密着性を高める必要がある。

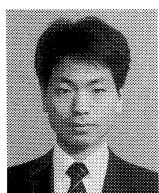
(3) 摩擦・磨耗対策 現在使用しているガラス粒子には、フィルム表面を磨耗させること、フィルム間距離を広げること等の問題がある。摺動面への表面処理等により、ガラス粒子を用いずに摩擦を低減する方法の開発が必要である。

(4) 耐環境性の強化 絶縁体は、水分や汚れにより絶縁性が低下する。また、移動子抵抗体は、温度・湿度により抵抗率が変化する。環境の影響を受けにくい材料の開発が必要である。

なお、本研究は東京大学および(財)神奈川科学技術アカデミー樋口「極限メカトロニクス」プロジェクトにて行われ、一部は平成2年、3年度文部省科学研究費補助金一般研究(B)02452129の援助を受けたものである。

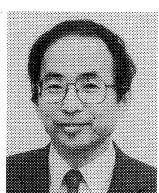
参考文献

- [1] O. D. Jefimenko : "Electrostatic Motors," *Electrostatics and its Applications* (edited by A. D. Moore), chap. 7, pp. 131-147, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1973.
- [2] 静電気学会編：静電気ハンドブック。オーム社, 1981。
- [3] B. Bollée : "Electrostatic Motors," *Philips Technical Review*, vol. 30, no. 6/7, pp. 178-194, 1969.
- [4] S. D. Choi and D. A. Dunn : "A Surface-Charge Induction Motor," Proc. of the IEEE, vol. 59, no. 5, pp. 737-748, May 1971.
- [5] L. S. Fan, Y. C. Tai and R. S. Muller : "IC-processed electrostatic micromotor," Sensors & Actuators, 20, pp. 41-48, 1989.
- [6] M. Yamaguchi, S. Kawamura, K. Minami and M. Esashi : "Distributed Electrostatic Micro Actuator," Proc. 1993 IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 18-23, Ft. Lauderdale, FL, 1993.
- [7] S. M. Bobbio, M. D. Kellam, B. W. Dudley, S. Goodwin-Johansson, S. K. Jones, J. D. Jacobson, F. M. Tranjan and T. D. DuBois : "Integrated Force Arrays," ibid., pp. 149-154.
- [8] R. E. Pelrine, J. S. Eckerle and S. Chiba : "Review of Artificial Muscle Approaches," Proc. Third International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp. 1-19, Nagoya, Japan, 1992.
- [9] 稲垣, 斎藤：“積層型静電アクチュエータの試作”，精密工学会誌, vol. 59, no. 10, pp. 1625-1630, 1993.
- [10] 壁井, 吉沢, 坂東, 村山, 長竹, 斎藤, 土屋：“生物の筋肉をモデルとした静電リニアアクチュエータ”，日本機械学会論文集(C編), vol. 61, no. 586, pp. 287-292, 1995.
- [11] 柄川, 新野, 樋口：“静電人工筋の開発とロボットへの適用”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93講演論文集, pp. 436-439, 1993.
- [12] T. Niino, S. Egawa, H. Kimura and T. Higuchi : "Electrostatic Artificial Muscle: Compact, High-Power Linear Actuators with Multiple-Layer Structures," Proc. 1994 IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 130-135, Oiso, Japan, 1994.
- [13] 柄川, 新野, 樋口：“静電力を利用したフィルムの搬送”，1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 197-198, 1990.
- [14] 新野, 柄川, 樋口：“静電力による紙送り機構”，精密工学会誌, vol. 60, no. 12, pp. 1761-1766, 1994.
- [15] 今野, 高田, 合田, 新野, 柄川, 樋口：“透明フィルムモータの開発”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91講演論文集, vol. A, pp. 73-74, 1991.
- [16] 今野, 合田：“静電フィルムアクチュエータの材料開発”, Mitsubishi Kasei R&D Review, vol. 6, no. 2, pp. 97-101, 1992.
- [17] 柄川, 新野, 樋口：“誘導電荷形静電アクチュエータの最適設計”, 第10回日本ロボット学会学術講演会, 1992.
- [18] 柄川, 樋口：“フィルム静電アクチュエーター-100 μm ピッチモデルの製作-”, 平成2年電気学会全国大会予講集, no. 783, 1990.
- [19] 樋口, 柄川：“移動子に抵抗体を用いた静電アクチュエータ”, 平成元年電気学会全国大会講演論文集, no. 737, 1989.
- [20] S. Egawa and T. Higuchi : "A Multi-Layered Electrostatic Actuator Fabricated on Polymer Films," Seisan-Kenkyu, vol. 41, no. 12, pp. 56-59, 1989.



柄川 索 (Saku Egawa)

1965年6月16日生。1993年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年(株)日立製作所入社。1993年より1994年(財)神奈川科学技術アカデミー樋口「極限メカトロニクス」プロジェクト研究員。現在(株)日立製作所機械研究所にてアクチュエータの開発に従事。工学博士。精密工学会、電気学会の会員。(日本ロボット学会正会員)



樋口俊郎 (Toshiro Higuchi)

1950年2月26日生。1977年東京大学大学院博士課程修了。同年、同大学生産技術研究所講師。1978年同助教授。1991年11月同大学工学部精密機械工学科教授。1992年4月より(財)神奈川科学技術アカデミー樋口「極限メカトロニクス」プロジェクトリーダーを兼任、現在に至る。メカトロニクスに関する研究に従事。工学博士。IEEE、精密工学会、電気学会の会員。(日本ロボット学会正会員)



新野俊樹 (Toshiki Niino)

1966年9月18日生。1995年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年、理化学研究所に基づき基礎科学特別研究員として入所。現在に至る。静電モータ、光造形装置の開発に携わる。精密工学会、電気学会、静電気学会、IEEEの会員。

(日本ロボット学会正会員)