特集 ■アクチュエータ・テクノロジー　～ヒトとの親和性を目指して～

静電アクチュエータとその応用

～ヒトとの親和性をめざす薄く透明なアクチュエータ～

山本晃生　東京大学
YAMAMOTO AKIO

1. はじめに

今回，ヒトとの親和性という観点から静電アクチュエータに関する記事を書かせていただくにあたり，まずアクチュエータにおける「ヒトとの親和性」とは何かを考えてみたい．より優れたヒトとの親和性を目指すとき，アクチュエータに必要とされる要件とは何であろうか．様々な考え方があろうかとは思うが，本稿では 4 つのキーワードを挙げてみたい．それは,「軽量」,「柔軟」,「薄型」,「透明」である．

そもそも，ヒトとの親和性を目指したアクチュエータというものが話題となること自体が，既存のアクチュエータ，すなわち，電磁モータはヒトとの親和性が必ずしも高く無い，ということを含意しているように思われる．では，既存のモータはどのような点においてヒトとの親和性が低いのだろうか．それはおそらく，硬くて重いという部分にあると思われる．ならばヒトとの親和性が高いアクチュエータは，軽く柔らかいものであるだろう．概して，重いアクチュエータは機器全体を重くする．そして，重い機器が運動すれば大きな運動量を持ち,万一ヒトとぶつかった時には大きな衝撃を与えうる．すなわち，ヒトとの親和性を安全面から考えれば，アクチュエータは軽い方が好ましい．また，アクチュエータの柔らかさも，その使い方によっては，衝突時の安全性に寄与しうる．

ヒトとの親和性としてもう一つ重要なものとして，心理的なもの，すなわち外観やイメージが考えられる．身の回りのより多くの機器や環境にアクチュエータが搭載される未来を想像したとき，それらが，いかにもメカっぽい見た目をしていては，雰囲気的にも落ち着かない．これに対し，アクチュエータが生体のように柔軟性を有していれば，そのイメージも多少は和らぐであろう．あるいは，薄く透明なアクチュエータであれば，アクチュエータを環境の中に埋め込み，その存在を意識させなくすることもできるはずである．

そのような訳で，本稿では上記の四つのキーワードを念頭に,静電アクチュエータについて紹介していきたい．

2. 静電気力

「静電気」と聞いて多くの人が思い浮かべるのは，冬場にバチッとくる，あの不快な現象であるだろう．その不快な静電気を使ったアクチュエータがヒトとの親和性に優れるとは，にわかには信じられないかもしれない．

静電気には確かに放電などのやっかいな現象がついて回るため,利用に際してはそれなりの注意が必要である．しかし，上手に使えば先に挙げた四つのキーワード，すなわち,「軽量」,「薄型」,「柔軟」,「透明」を特徴として持つアクチュエータが実現できる．

一般的に静電気力というのは微弱な力であると認識され，静電気力が有効に活用できるのは微小領域のみと思われることが多い．確かに，静電気力の応用はマイクロ分野での応用が多く，静電アクチュエータ研究も，その大半はマイクロアクチュエータに関するものである．しかし一方で，静電気力の特徴を上手く活用することで,数Nから数十Nにもおよぶ推力を生み出す静電アクチュエータも実現されている.そして,それらの静電アクチュエータは，上記の軽量・薄型・柔軟・透明といった特性を兼ね備えており，ヒトとの高い親和性が期待できる．

では，弱いはずの静電気力で，どうやって，そのようなアクチュエータが実現されうるのか，次節においてその点を考察してみたい．

3. 静電気力は弱いのか？

電磁気学で習う二つの力，静電気力と磁気力は，どちらが強いだろうか．直感的には，磁気力の方が圧倒的に強いように思えるが，まずは，その点を確認してみたい．以下，文献 [1][2] などにおける議論も参考に，静電気力の大きさについて考察する．

静電アクチュエータの簡単なモデルとして，図 1(a) に示す単純な平行平板コンデンサモデルを考える．2 枚の対向した電極に電圧を印加したとき，電極に働く静電吸引力は，

$$F_e = \frac{\varepsilon S}{2}\left(\frac{V}{d}\right)^2 = \frac{\varepsilon S}{2}E^2$$

と表される．ただし，ε は電極間の誘電率，E は電極間に発生する電界を表す．このように静電気力は電界の 2 乗に比例するため，式の上では，電界を大きくすればいくらでも強い静電気力が得られることになる．しかし実用的には実現できる電界 E には上限があり，それは絶縁破壊によってもたらされる．例えば，大気中で高い電界を発生させると電極間で放電が起きる．放電が始まる電界は諸条件により異なるが，代表的な値としては 3 MV/m が良く用いられる．この値を用いて先ほどの静電気力の上限値を計算すると，単位面積あたりの静電気力 (F_e / S) が約 40 N/m^2，身近な単位で表せば，1 cm^2 あたり 0.4 gf が最大ということになる．

一方の磁気力について考えてみると，こちらも磁気飽和や電磁石の発熱などによる上限があるが，それでも，1m^2 あたり 10^{5}N オーダの力を発生することができる．これは静電気力と比較すると実に 4 桁も大きな値である．これと比べれば，確かに静電気力は弱いのである．

さて，上でも述べたが，静電気力の上限を定める放電開始電界は諸条件によって異なる．前述の数値は大気中での代表値であるが，この値は電極間距離が縮まってくると急激に増大することが知られている (パッシェンの法則)[3]．よって，微細加工などによって微小な電極距離を持った構造体を作れば，より大きな電界が実現できる．あるいは，電極間を絶縁耐力に優れた気体や液体で置き換えても良い．静電気力は電界の 2 乗に比例するので，そのようにして発生電界を一桁大きくできれば，発生しうる静電気力を二桁大きくすることができる．

しかし二桁大きくなってみても，まだ磁気力とは開きがある．そこで，もう一歩踏み込んでアクチュエータの重量・寸法も考慮した性能評価について考えてみたい．異なるサイズのアクチュエータがあったとき，大きく重いアクチュエータが強い力を発し，小さく軽いアクチュエータが小さな力しか発生しないのは当然である．つまり，アクチュエータの寸法・重量を無視して，単にその発生力の大小だけを比較しても無意味であり，本質的な比較は，アクチュエータの単位重量あたり，あるいは，単位体積あたりの発生力により行われるべきである．そのように考えた場合，仮に静電気力が磁気力に比べて二桁小さいならば，アクチュエータ重量，あるいは，体積を二桁小さく作れば，アクチュエータ性能としては同等なものが得られることになる．では，そのようなことは可能なのだろうか．

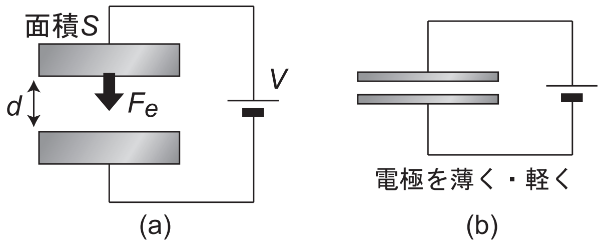

図 1　アクチュエータモデルとしての平行平板コンデンサ

静電気力のメリットは，電極を薄く軽く製作できる点にある．磁気力の発生には，永久磁石にせよ，電磁石にせよ，ある程度の体積と重量を必要とする．これに対し，静電気力は薄い導体に電圧を印加するだけで容易に発生できる．よって，図 1 (b) に示すように，電極を含むアクチュエータ構造をできるだけ薄く，そして，軽くしていくことで，単位体積あたり，あるいは，単位重量あたりでの推力を高めることができ，電磁モータにも匹敵するアクチュエータ性能が実現される．

そのような薄い電極構造を実現する具体的な一つの手段が，プラスチックフィルムなどのシート状部材の利用である [1]. 薄いシート上に電極を形成する技術としては，フレキシブルプリント回路基板などの既存の技術が利用できる．

4. 静電フィルムアクチュエータ

シート状電極を用いた静電アクチュエータは，現在までにいくつかの種類が提案されているが [1][4-6], ここでは，代表的な二つのフィルムアクチュエータを紹介させていただく．一つは，柄川らにより提案された誘導電荷形アクチュエータ [1]，もう一つは，新野らによる両電極形アクチュエータ [5] である．いずれも，フレキシブルプリント基板などを利用してシート状部材に微細な電極を埋め込んでおり，それにより静電アクチュエータとし

ては大きな発生力を実現している．駆動電圧としては，ロボット応用などの高い推力を必要とする用途には，1 ～ 2 kV 程度の電圧が用いられ，この場合，大気中の放電を防ぐため，誘電性液体中で駆動される．一方，後述する紙送り用途などのように大きな推力発生を必要としない場合には300～600 V程度の電圧で駆動可能であり，その場合には直接大気中で駆動される．

4.1　誘導電荷形

誘導電荷形は，電極構造を有する固定子フィルムと，表面抵抗値の調整された移動子フィルムから構成される．模式図を図 2 (a) に示す．固定子電極に対して一定電圧を印加すると，移動子表面に微小電流が流れ電荷パターンが形成される．その後，固定子側電圧を切り替えて固定子上の電圧分布を横にシフトさせていくことで，移動子上の電荷パターンに加わる静電気力により移動子が駆動される．この方式は，次に紹介する両電極形よりも発生力は低いが，移動子に電極構造が不要なため，移動子として多様なものを用いることができる．移動子として利用可能なものは表面抵抗値が $10^{14}\Omega$ 前後の素材とされているが [1][7]，一部の紙は表面抵抗値がこの範囲内に収まるため，固定子電極上に置いて直接搬送することが可能である [7].

4.2　両電極形

両電極形は，移動子・固定子の両者に電極構造を持たせたものであり，両者に電圧を印加することで，誘導電荷形よりも大きな推力を発生することができる．電極構造として，3 相電極を用いたもの [5] や 4 相電極 [4][6] を用いたものなどが提案されているが，多く研究されているのは，移動子・固定子の両者に 3 相電極を用いたものである [5]．模式図を図 2 (b) に示す．このタイプでは，移動子・固定子の両者に 3 相正弦波を印加することにより，電極間に働く静電気力により移動子を駆動する．このタイプは同期式のアクチュエータとなり，移動子の動作速度は印加電圧の周波数に比例する．また，移動子の位置を検出し，位置に応じた印加電圧を与えることで，推力の制御も容易である [8].

主な性能としては，最高動作速度 1 m/s 以上，単位重量あたりの推力 630 N/kg などが報告されている [5].

4.3　特徴

上で紹介した 2 種のフィルムアクチュエータは，いずれも軽く，薄く，柔らかい．図 3 は，両電極形を様々な方向に変形させて駆動している様子であるが [9][10]，誘導電荷形においても同様に曲げて動作させることが可能である．

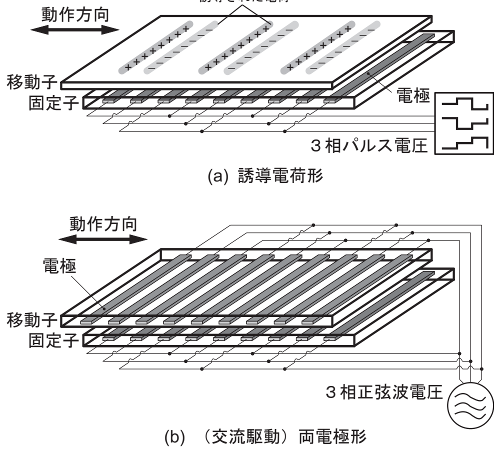

図 2　2 種の静電フィルムアクチュエータ

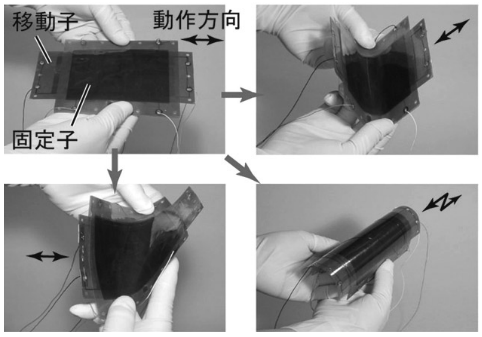

図 3　変形しながら動作する例（両電極形）
動作中でも様々な方向に変形可能

また両アクチュエータとも，透明化可能である [11]．図 4 は, 両電極形アクチュエータを透明化した例である．ベースとなるフィルムに透明な素材を用い，その上に ITO などの透明導電体で電極を形成すると，このような透明アクチュエータが実現できる．

アクチュエータの薄く平明的な構造を活かすことで，複数の移動子・固定子フィルムの組を積層して推力を増大することも可能である [1]．例えば, 両電極形において 50 組の移動子・固定子フィルムを積層し，300N の推力を記録した例が報告されている [12].

5.　応用

今のところ，静電フィルムアクチュエータに関して商品化にまで至った例は無いが，ロボット，広告･アミュー

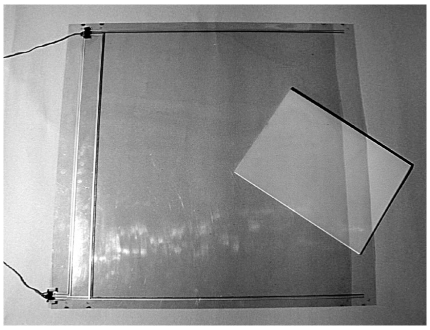

図４　透明アクチュエータ（両電極形）＊口絵にカラー版掲載
（白い冊子はアクチュエータが透明であることを示すために，
アクチュエータの背後におかれたもの）

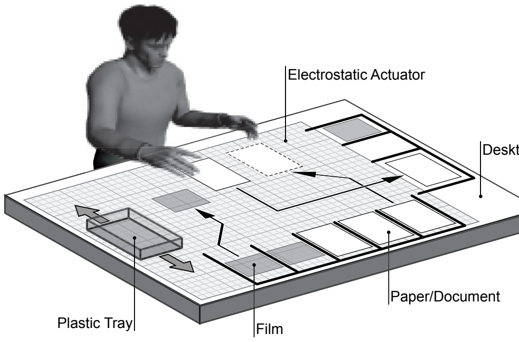

図５　静電アクチュエータによるデスクトップオートメーション

ズメント，インタフェースデバイスなどとしての応用が模索されている．

ロボット応用としては，より大きな推力を得られる両電極形の利用が検討されている．軽量・ダイレクトドライブといった特徴を活かした 2 自由度ロボットアームの試作 [13] や，アクチュエータの柔軟性を活かした魚ロボットの試作例 [14] が，これまでに報告されている．

広告・アミューズメント用途としては，図 4 のように, 透明化したアクチュエータの利用が検討されている．図 4 の例は両電極形によるものであり，移動子・固定子の両者が透明化されているが，誘導電荷形で固定子のみを透明化し，紙を移動子に用いれば，紙がひとりでに動いているような不思議な状況を演出することも可能である．これらは，広告やアミューズメント用途への利用が期待できる．

薄くて透明という特徴を活かし，アクチュエータを環境中に埋め込んでインタフェースとして用いることも提案されている．例えば，デスクの表面に静電アクチュエータを埋め込むことで，デスクトップの自動化 (例えば書類の搬送) を行おうとする研究が提案されている (図 5)[15]．このようなデスクトップインタフェースとしては，電磁式アクチュエータを用いた提案が過去に複数なされているが，静電アクチュエータを用いると，搬送力等に制約は生じるものの，フィルムをデスク表面に敷くだけの簡易な構造でデスクトップインタフェースが実現できる可能性がある．

インタフェース用途としては，この他にもハプティックデバイスとしての応用が検討されている．文献 [16] では，両電極形アクチュエータを用いて，表面粗さ感などのテクスチャ感呈示を行った例が報告されている．このアクチュエータは, 移動子重量が軽く (数 g), 減速器を介さないダイレクトドライブであるため，微細な力の変化を移動子上に発生させることができる．そこで，移動子を指で動かし，その動きに応じて移動子に推力変化を与えることで，細かい凹凸感を表現することができる．

また，より一般的な構成のハプティックデバイスとしては，例えば 2 自由度のジョイスティック型デバイスなどが試作されている [17]．そのようなハプティックデバイスの応用としては，静電アクチュエータが非磁性である点を活かして，MRI(磁気共鳴画像診断) 装置近傍での利用が模索されている [18]．

6. まとめ

本稿では，ヒトとの親和性に絡んだ四つのキーワードを念頭におきつつ，静電フィルムアクチュエータについて解説した．現段階では，ヒトとの親和性を直接的に示す事例は紹介できないが，いくつか紹介した研究事例の中から，多少なりとも，その可能性を感じ取っていただければ幸いである．

参考文献

[1] S. Egawa, T. Higuchi: Multi-Layered Electrostatic Film Actuator, Proc. IEEE MEMS 90, pp. 166-171 (1990)
[2] 柄川：静電アクチュエータ，マイクロマシン技術総覧 pp. 461-467，産業技術サービスセンター (2003)
[3] 武田：気体放電の基礎，東京電機大学出版局 (1990)
[4]T. Niino, S. Egawa, N. Nishiguchi, T. Higuchi: Development of an Electrostatic Actuator Exceeding 10N Propulsive Force, Proc. IEEE MEMS 92, pp. 122-127 (1992)
[5] 新野，樋口，柄川：交流駆動両電極形静電モータ，日本ロボット学会誌，15, 1, pp. 97-102 (1997)
[6] N. Yamashita, A. Yamamoto, M. Gondo, T. Higuchi: Evaluation of an Electrostatic Motor Driven by Two-Four-Phase AC Voltage and Electrostatic Induction, Proc. IEEE

ICRA 2007, pp. 1572-1577 (2007)
[7] 新野，柄川，樋口：静電気力による紙送り機構，精密工学会誌，60, 12, pp. 1761-1764 (1994)
[8] 山本，新野，樋口：高出力静電モータを用いた高精度位置決め制御，精密工学会誌，64，9，pp. 1385-1389 (1998)
[9] 西嶋，山本，樋口，稲葉：柔軟な構造を有する静電フィルムアクチュエータの開発，精密工学会誌 , 69, 3, pp. 443-447 (2003)
[10] A. Yamamoto, T. Nishijima, T. Higuchi: Deformable Electrostatic Linear Motor", Proc. IEEE TExCRA 2004, pp. 27-28 (2004)
[11] S. Egawa, T. Niino, T. Higuchi: Film Actuators: Planar, Electrostatic Surface-Drive Actuators, Proc. IEEE MEMS 91, pp. 9-14 (1991)
[12] T. Niino, S. Egawa, H. Kimura, T. Higuchi: Electrostatic Artificial Muscle: Compact, High-Power Linear Actuators with Multiple-Layer Structures, Proc. IEEE MEMS 94, pp. 130-135 (1994)
[13] 西嶋，山本，樋口，稲葉:静電フィルムアクチュエータを用いた２自由度ロボットアームの開発，精密工学会誌，71, 12, pp. 1574-1578 (2005)
[14] Z.G. Zhang, N. Yamashita, M. Gondo, A. Yamamoto, T. Higuchi: Electrostatically Actuated Robotics Fish: Design and Control for High-mobility Open-loop Swimming, IEEE Transactions on Robotics, 24, 1, pp. 118-129 (2008)
[15] A. Yamamoto, H. Yoshioka, T. Higuchi: A 2-DOF Electrostatic Sheet Conveyer Using Wire Mesh for Desktop Automation, Proc. IEEE ICRA 2006, pp. 2208-2213 (2006)
[16] 石井，山本，樋口：薄型静電アクチュエータを用いた皮膚感覚ディスプレイの開発, 電気学会論文誌 E, 122，10，pp. 474-479 (2002)
[17] 平野，山本，一柳，樋口：静電フィルムモータを用いたジョイスティック型 2 自由度ハプティックデバイスの試作，ロボティクス・メカトロニクス講演会 '06 講演論文集 , 1P1-D02 (2006)
[18] A. Yamamoto, K. Ichiyanagi, T. Higuchi, H. Imamizu, R. Gassert, M. Ingold, L. Sache, H. Bleuler: Evaluation of MR-compatibility of Electrostatic Linear Motor, Proc. IEEE ICRA 2005, pp. 3669-3674 (2005)

【略歴】
山本　晃生 (YAMAMOTO Akio)
東京大学　大学院工学系研究科　准教授
1999 年東京大学大学院工学系研究科・博士課程修了，博士 (工学)．1999 年東京大学大学院工学系研究科助手，2000 年同講師，2005 年より同助教授 (現職)．専門はメカトロニクス，アクチュエータ，触力覚インタフェース．