マイクロアクチュエータ

正 員 鈴木 康一 (岡山大学)

正 員 川原 伸章 (株式会社 デンソー)

Microactuators

Koichi Suzumori, Member (Okayama University)

Nobuaki Kawahara, Member (Denso Corporation)

This paper represents a review of recent microactuator technologies. The problems and potentials of scaling actuators down to microscopic scale are first discussed from two points of view. One is based on scale rules; several examples of driving forces and structures suitable for miniaturization are examined. A great potential of microactuators as communication devices is also discussed.

Recent R&D activities on microactuators are reviewed. These include electromagnetic, electrostatic, piezoelectric, shape memory alloy, polymer gel, light-driven, giant magnetostrictive, pneumatic, hydraulic, and muscle-like actuators.

キーワード: マイクロアクチュエータ, MEMS, マイクロマシン

Keywords: microactuator, MEMS, Micromachine

1. はじめに

アクチュエータとは、電気、化学、熱、流体等のエネルギーを受けて何らかの運動を行うデバイスと定義できる。運動の形態からは、回転型、直動型（リニア）、その他（湾曲、多自由度動作、等）に分類することができる。アクチュエータの駆動原理からは、静電方式、圧電方式、電磁方式、形状記憶合金方式、光駆動方式、油空気圧方式、高分子の相変態を利用する方式などに分類することができる⁽¹⁾。

従来の通常の大きさのアクチュエータの大部分では、電磁方式または油空気圧方式が用いられてきた。しかし、マイクロアクチュエータでは、電磁と油空気圧方式以外にも色々な方式が用いられ、また、アクチュエータの構造もマイクロアクチュエータ特有の工夫が必要となってくる。

その理由の一つは、スケール効果に起因する。電磁力を発生するには常に電流をコイルに流しておく必要があり、マイクロアクチュエータでは、特にサーボロック時には、その発熱と放熱の問題が従来の電磁アクチュエータよりはるかに重大になってくる。従来の機械の大きさでは発生力が小さすぎて利用できなかった静電アクチュエータは、マイクロ化に伴い他の方式の駆動原理に比べて同等あるいは大きな発生力を持つアクチュエータと位置づけられてくる。熱効率や応答性がネックとなっていた形状記憶合金アクチュエータはマイクロ化に伴いこれらの欠点が解消されてくる。軸受け部の摩擦・磨耗はマイクロ化に伴い重大な問題となる。このため、マイクロアクチュエータでは動作

部分の支持方法が重要課題となる。微細加工技術とのマッチングがよい構造も不可欠となる。このようなマイクロ化に伴う物理現象の違いのため、マイクロアクチュエータには従来のアクチュエータとは異なった新しい工夫や方式が求められてくる。

もう一つの理由は、情報を扱うアクチュエータのニーズ増大に起因する。情報・通信技術とマイクロアクチュエータの結びつきは本質的なものである。“情報”自身には大きさがない。重さもない。情報の媒体、即ち、電磁波、振動、磁気配列、微細形状、化学物質の成分、分子・原子配列、等々には、大きさや重さが伴うが、これらはあくまでも媒体であり、できる限り小さくすることが本質的に望まれる。これら媒体を動かすマイクロアクチュエータには、大きな力や動作ストロークは要求されない。要求されるのは、量と速度である。これは、従来のアクチュエータが対象とした、例えば、新幹線や建設機を思い浮かべて比較すれば違いが明白になる。情報を扱う機器で要求される加速度や動作周波数は、新幹線で要求されるものよりも遙かに高い。情報を取り扱うアクチュエータでは、高密度化と高速化を実現するためマイクロ化が本質的なのである。従来用いられてきた電磁方式や油空気圧方式は、新幹線や建設機を駆動・制御するのに最も適した手段であったが、情報を扱うマイクロアクチュエータでは、究極的に要求される特性を実現するには別の方式の方が適しているかもしれない。

このような背景で、近年、特にMEMS技術と結びつきながら、マイクロアクチュエータの研究開発は活発に進めら

れてきた。最近は、マイクロ静電アクチュエータを用いた製品も実用レベルに達したものがいくつかある。また、水素を微小なチャンバで燃焼させるマイクロタービンの研究⁽²⁾など、新たな駆動方式の研究も進められており、マイクロアクチュエータ研究自体がさらに広がりを見せている。

2. 駆動方式の特長と比較

運動方式のうち、回転型と直動型以外はデータが少なく比較が難しいが、回転型と直動型について、開発されたマイクロアクチュエータのデータを基にそれぞれの駆動方式の長所、短所、特徴を表1、2にまとめた⁽³⁾。近年発表されている研究はほとんどが直動型で、回転型の発表は少ない。回転型は直動型に比べ構造が複雑になるためと思われる。駆動方式別では、研究例は静電方式がもっとも多く、国際会議のアクチュエータ発表のおよそ1/3を占める。駆動方式として2番目に多いのは、圧電方式である。近年の発表論文数の約1/5を占めている。ほとんどがPZTセラミックの逆圧電効果を利用したもので、高出力、高速応答が特徴である。

表1に回転タイプのアクチュエータの比較を示す。マイクロアクチュエータは、開発段階にあり、トルク、発生力の計測手法なども確立しておらず、簡単に比較することはできないが、個人的意見も交えながら、各方式の得失についてまとめてみる。

(1) **電磁方式** 電磁方式は、高効率、高出力のメリットがあり、中小型のモータで抜群の実績があるが、マイクロモータの研究例は少ない。効率がよく、高パワーの特

徴を生かした移動機構や作業機構向きと言える。課題としては、磁石、コイル、ロータへの給電機構など構造が複雑になりマイクロ化の難しさがある。具体的な開発課題としては、高占積率な電磁コイルの作製方法、高エネルギー密度な薄膜磁石開発等がある。電磁に限らず回転型は、いずれの方式においても、軸受けの磨耗の問題があり、常時回転、高速回転タイプでは、軸受けが必須である。軸受けとしては、空気軸受け、磁気ベアリング⁽⁴⁾、マイクロの特徴を生かした静電力で浮上させるもの⁽⁵⁾などが開発されており、超小型、高速回転モータの実用化も遠い夢ではなくなった。電磁のリニアアクチュエータとしては、ある意味、ボイスコイルを使用したスピーカもアクチュエータと言っても良いはずで、長年の実績がある。

(2) **静電方式** 静電方式は、対向する電極の静電力（一般的に異なる極性の電極に働く静電引力を用いるものが多い）を利用するため、小型化するほど、体積あたりの出力が大きくなる。これは、サイズを1/10にすると、体積は、1/1000、表面積は1/100になるため、体積あたりの表面積は、元のサイズの10倍多くなることに起因する。上記の理由から静電アクチュエータは、半導体プロセス（MEMS技術）で作られる例が多く、微細加工された櫛歯等で表面積を大きくして使われる。1980年代後半に、半導体プロセスで作られた直径120ミクロンの静電モータは、MEMSを一躍有名にし、多くの研究開発がスタートした。このアクチュエータの最大のメリットは、シリコン基板上に、回路と一緒に同じ半導体プロセスで作るこめる点にあり、集積化が可能などである。そのた

表1 アクチュエータ（回転）技術比較検討

方式	長所	短所	備考
1.電磁タイプ1 アキシアルギャップ電 磁モータ	高出力 低電圧駆動 構造が2に比べ簡単	構造やや複雑→小 型化難	構造が複雑でマイクロ化が難しい問題であるが、 電磁モータはこれまでの実績があり、高効率・高 出力のメリットがある。作業などのアクチュエー タとして適する。開発の課題は高エネルギー積の 薄膜磁石および高占積率のコイルの開発。
2.電磁タイプ2 ラジアルギャップ電磁 モータ	高出力 エネルギー変換効率大 低電圧駆動	構造複雑→小型化 難	
3.圧電タイプ	高出力 構造簡単 応答速度早い	摩擦大→短寿命 低効率 高電圧駆動	短寿命、低効率の問題があるが、構造がシンプル でマイクロ化に有利。また、接触法式で、オフの 状態では固定となるので、マニピュレータの継ぎ 手の駆動等に適する。常時回転する機構には不向 き。
4.静電タイプ1 アキシアルギャップ静 電モータ	構造簡単 低消費電力	出力小 高電圧駆動	出力が小さく、駆動電圧が高い問題があるが、サ イズが1mmより小さくなると効率・パワーとも 電磁タイプより優れるため、サブミリのモータに 適する。アキシアルギャップタイプはギャップの 制御が難しい点を除けば、構造が簡単で小型化し やすくラジアルタイプよりも高出力が得られる。
5.静電タイプ2 ラジアルギャップ静電 モータ	構造比較的簡単 低消費電力	出力小 高出力化のために 減速機要 高電圧駆動	
6.静電タイプ3 静電ウォブルモータ	低摩擦 組立不要 低消費電力	低回転 出力小 高電圧駆動	回転が歳差運動で回転軸がぶれる。駆動電圧が高 い問題があるが、半導体プロセスにより組立不要 で作製でき、高トルク、低回転の用途に向く。小 型化も有利。

め、このメリットを生かした回路と一体型の加速度センサ、ジャイロセンサ⁽⁶⁾、DMD 等の表示装置、光通信用スイッチ等に広く応用されている。

(3) **圧電タイプ** 圧電アクチュエータのメリットは、出力が大きく、構造体自体がアクチュエータとなるため高剛性のデバイスが作れること、構造が単純で、変位が電圧で制御できること、微小な変位が作れること、高速応答が可能などなどがあげられる。デメリットとしては、変位が小さい（一般的にアクチュエータサイズの0.1%程度）ことがあげられる。用途としては、比較的パワーの必要な構造体を振動させる用途、液体ポンプ、超音波振動子などがある。すでに、回転タイプでは、圧電体のアレイを用いて超音波の進行波を生じさせ、接触するロータを回転させる超音波モータが実用化されている⁽⁶⁾。直動タイプでは、積層圧電アクチュエータ、バルクアクチュエータ、圧電体の振動を利用したジャイロセンサ等については製品化されている⁽⁷⁾。最近では、インクジェットプリンタヘッドや、新たな圧電アクチュエータを用いたディスプレイ⁽⁸⁾も実用化されており、用途が拡大している。圧電アクチュエータの使い方としては、多くはバルクのPZT（ジルコンチタン酸鉛）を加工して用いているが、小型化のためには、薄膜プロセスでシリコンの構造体と一体化することが望まれている。課題として、圧電特性の良い薄膜形成技術、シリコンプロセスとの融合化があげられる。

(4) **形状記憶合金方式** 形状記憶合金アクチュエー

タのメリットは、圧電アクチュエータと同様、構造自体がアクチュエータとなること、また、圧電アクチュエータに比べて変位が大きいことが上げられる。多くは、Ti-Niの合金が用いられ、重量、体積あたりの変位、発生力大きいこと、比較的簡単に薄膜化ができるので、シリコンの構造体と一体化できることもメリットである。デメリットとしては、電力を熱に変え、形状記憶合金の変態を行うため消費電力が大きいこと、応答速度が遅いことが上げられる。特徴として、動作時に音がしないので、音の発生を嫌うシステムに使われることが多い。三菱電線工業は、形状記憶合金を用いたコイルばね形状のアクチュエータを実用化しており、1mm以下の小径のものでは、高速応答も可能である。

マイクロマシンに用いられるアクチュエータの多くは、これまで述べてきた静電、圧電、電磁、形状記憶合金であるが、特徴を持った他の方式の研究も行われている。代表的なものを以下に示す。

(5) **ポリマーアクチュエータ** 電解液中での駆動に限定されるが、外部から電界を加えると変形するアクチュエータがある。アクリル/アクリル酸重合体やポリアクリル酸を含む反復凍結ポリビニルアルコールゲルが開発されている⁽⁹⁾。このゲルを帯状にしたアクチュエータは電界を加えると負極側に屈曲し、電界の極性を反転すると逆に屈曲する。これは、ゲル中のイオンの分布が電界により変化し、これにより膨張・収縮が起こるため屈曲すると考えられて

表2 アクチュエータ（リニア）技術比較検討

方式	長所	短所	備考
1. 静電タイプ	構造シンプル 積層により高出力化可能 低消費電力	高電圧駆動 発生力小	ICプロセスにより小型化可能なため、小型で低消費電力のアクチュエータ向き。
2. SMA (形状記憶合金)	構造、機構単純→小型化容易 出力/重量比大	低効率（熱→相変態） 低応答速度 短寿命	エネルギー効率は悪いが、構造体がアクチュエータを兼ねるのでマイクロマシンの設計自由度が上がる。難加工材料のSMAの微細加工、薄膜化が課題。
3. 光駆動タイプ	電気不使用 構造単純→小型化容易	低効率 発生力、変位小 応答速度遅い	効率が低く力を取り出せないが、電気が使えない環境（生体内、爆発等危険環境）でも駆動できる。電磁波ノイズの影響もない。
4. 油圧タイプ	発生力大	構造複雑	油圧源と一体構造となれば、マイクロ化の特徴（油圧の供給パイプなし）がある。発生力が大きいので作業に向く。
5. 空圧タイプ	高出力 形状単純 電気不使用	空圧の供給がある 供給パイプの圧損がある ので小型化難	空圧の供給の問題があるが、実際に加工・作業をするなどの力の必要な駆動に適する。
6. 圧電進行波タイプ	高速、大変位	発生力小、摩擦の問題あり、小型化で共振周波数が高くなる。	力のいらない、高速部品搬送などに向く。
7. 圧電グリップタイプ	発生力大	低速、構造複雑	オフの状態では固定となるのでマニピュレータの継ぎ手に向く。
8. 電歪ポリマー	大変位 形状単純→小型化容易 高効率	高電圧 発生力は圧電より小さい	変位も発生力も圧電とSMAの中間でバランスが良い。薄膜、積層化による低電圧駆動が課題。

いる。このアクチュエータを胴体に取り付けた人工魚は、電解液中を泳ぐことができる。大きな変位が得られることが特徴である。

(6) **分子アクチュエータ** フォトメカニカル効果により光感受性分子の分子間距離が変化する光アクチュエータがある。分子アクチュエータとも言われる。特定の波長の光を照射すると異性体に変化し、分子間距離が変化する。なかでも、アゾベンゼンは、あてる光の波長により、トランス型とシス型の分子構造に可逆変化し、その分子間距離が60%も変化することから、大変位のアクチュエータとして非常に大きな可能性を秘めている。しかしながら、一般的に分子アクチュエータは溶液状であり、大きな変位を生かしながら、仕事を外に取り出すのが難しいという問題がある。最近、この分子アクチュエータを単分子膜化し、実用に耐えるアクチュエータにする研究⁽¹⁰⁾も行われている。今後の開発に期待したい。

(7) **光歪アクチュエータ** 光を駆動源とするアクチュエータとしてPLZTがある。PLZTは、Laを添加したPZTで、(Pb,La)(Zr,Ti)O₃圧電材料である⁽¹¹⁾。光を照射すると、その材料の分極方向に伸び縮みする。発生力は圧電体なみに大きく、変位はPZTよりも大きいという特徴を持つ、応答速度が遅いという問題もある。

(8) **超磁歪アクチュエータ** 磁場を加えると伸び縮みする超磁歪アクチュエータがある。これは、超磁歪材料と言われる合金を用いたもので、磁場を加えると0.1%程度のひずみを生じる。磁歪材料として、一般的にはTb-Dy-Te系の合金の単結晶を用いており、外部磁界の方向に結晶の格子が歪む磁歪現象を利用している。PZTに比べエネルギー密度、ひずみ量が大きく、応答性も速いという利点があり、ポテンシャルの高いアクチュエータであるが、結晶性の良い単結晶を大量につくる技術が確立しておらず、研究例は少ない。名古屋大学福田らは、超磁歪素子をもちいた管内移動ロボット⁽¹²⁾を開発し、外部からの10Hzの交流磁界を加え、管内のロボットを0.5mm/secで移動させることに成功している。

(9) **振動場を利用したアクチュエータ** 外部振動を受けて振動するアクチュエータがある。これは、シリコンプロセスで作成されたもので、共振周波数の異なる足を持つアリ型ロボットは、外部から与えられる振動により特定の足が共振し、これにより移動、回転等の動きをすることができる⁽¹³⁾。

(10) **空気圧アクチュエータ** 空気圧アクチュエータは、空気圧で動くシリンダから構成されリニアな動きをするものが多く、油圧と比べ簡便で安全なため、中大型の産業分野で広く使われている。マイクロなものではフレキシブルマイクロアクチュエータ(FMA: Flexible Microactuator)がある⁽¹⁴⁾。アーム型のFMAは、横断面に扇型の3つの圧力室を有する繊維強化ゴムの成形品からなる。マカロニの内部が3つの部屋に分かれた構造をしている。各室の圧力の制御により、湾曲することが出来る。外

部から空気圧を供給する必要があることと、そのための供給パイプが嵩張るデメリットがあるが、構造が簡単で多自由度の動作が出来ること、SMAなどと同様、構造体を兼ねるため設計自由度が高い、動きが柔軟であることなどの多くの特徴を持っている。

(11) **人工筋肉アクチュエータ** SRI Kornbluhらは、特殊な弾性ポリマーを電極でサンドイッチした人工筋肉アクチュエータを開発した⁽¹⁵⁾。電極間に電圧を印加すると電極は静電力により引きあい、ポリマーが変形する。この変形量は大きく300%にも達する。応答速度も0.5msec程度と速い特徴を持つ、課題としては、300から5kVという高い電圧を要することがあげられる。現在、ポリマーを薄くすることにより、低電圧駆動を目指した研究を行っている。

上述のように、マイクロアクチュエータに関する多くの研究例がある。アクチュエータ毎に特徴があり、使う用途により向き不向きがある。マイクロマシンのシステムは今後一層多様化して行くと考えられるので、システムに合ったアクチュエータを選択利用して行くことが必要である。システムにより、必要とする出力、供給できるエネルギーもシステム毎に異なるため、そのシステムに最適のアクチュエータを考慮しなくてはならない。

システムに搭載する場合に考慮すべき項目としては、出力(発生力)、変位、エネルギー変換効率(消費エネルギー)、サイズ(小型化の可能性)、発熱量、出力/重量比、出力/体積比、エネルギーの供給方法などが挙げられる。また、アクチュエータの発生力を効率良く伝える動力伝達機構も極めて重要である。たとえば、マイクロギアを用いた減速機構などは、高速回転の電磁モータと組み合わせて使うと、高トルクの出力を得ることも可能である。マイクロなラック&ピニオン構造で回転運動をリニアに変換する研究もあり、アクチュエータ単体ではなく、動力伝達機構とセットで考慮する必要がある。

(平成14年9月20日受付)

文 献

- (1) (財)マイクロマシンセンター監修: マイクロマシン革命, 日刊工業新聞社(1999)
- (2) A.H. Epstein, et al.: The 8th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (2000)
- (3) (財)マイクロマシンセンター提供
- (4) M. K. Ghantasala, L. Qin, D. K. Sood, and R. B. Zmood: "Design and Fabrication of a Micro Magnetic Bearing", *J. of Smart Material and Structure*, Vol. 9, No.1 (2000)
- (5) T. Murakoshi, K. Fukatsu, and M. Esashi: "Electrostatically Levitated Rotational Gyroscope", *International Conference of Solid State Devices and Materials*, 474 (2000)
- (6) 例えば: <http://www.tky3web.ne.jp/~usrmotor/theoryandstructj.html>
- (7) 例えば: <http://www.in.mesh.ne.jp/tokin/ce/tcc1-3.htm>
- (8) http://www.ngk.co.jp/public/new_rele/2001/2001_10_16.htm
- (9) 志賀 亨・ほか: 高分子論文集, 46 (1989)
- (10) T. Seki: "Light Driven Mass Migration in Nano-Hybrid Polymer Films", The Seventh International Micromachine Symposium,

P.65 (2001).

- (11) 服部 忍・ほか: 日本ロボット学会誌, 9, 6, P.692 (1991-6)
- (12) T.Fukuda, et.al.: Proceedings of IEEE MEMS '91, 1991
- (13) 安田 隆・ほか: 日本システム工学会研究会資料 (1993)
- (14) 鈴森康一・ほか: マイクロロボットのためのアクチュエータ技術, コロナ社 (1999)
- (15) R. Kornbluh, R. Pelrine, Q. Pei, and S. Chiba: "Applications of Dielectric Elastomer Artificial Muscle", 7th International Micromachine Symposium, p173 (2001)

鈴 森 康 一 (正員) 1959 年 4 月 3 日生。84 年横浜国立大学大学院修士課程修了。同年, (株) 東芝 入社。84 年～2001 年, 同社総合研究所(現, 研究開発センター)にて, ロボット, アクチュエータ, マイクロマシンの研究開発に従事。90 年横浜国立大学大学院博士課程修了。2001 年 2 月岡山大学工学部システム工学科教授。

川 原 伸 章 (正員) 1957 年 5 月 16 日生。83 年九州大学大学院総合理工学研究科修士課程了。同年日本電装(株) (現: 株式会社デンソー) 入社。以来, マイクロデバイス, マイクロマシンの研究開発に従事。機械学会会員。工学博士。