

静電アクチュエータの解析と拡大モデルによる性能評価

Analysis of an Electrostatic Actuator and Performance Measurement by its Scale Model

藤 田 博 之*・面 高 秋 人*・原 田 昌 信*

田 中 秀 郎**・大 谷 淳 一*

Hiroyuki FUJITA, Akito OMODAKA, Masanobu HARADA,

Hidero TANAKA and Jun'ichi OHTANI

1. は じ め に

工学の多くの分野で、たとえば光ファイバーや細胞など、微小な対象を精密に操作する要求が増えている。このため、従来の精密機械よりさらに小さな操作機構を作る研究が始められている。最近の成果としてVLSI製造用に開発されたシリコンの微細加工技術（マイクロマシーニング）を援用して、10 μ m程度の大きさのギア・ピンジョイント・微小渦巻バネなどの機構部品を作ることができるようになった^{1,2)}。このようなマイクロストラクチャを駆動する超小型アクチュエータとして、静電力を駆動源とする方式が有力視されている³⁾。静電力を駆動源とするいわゆる静電モータについては、これまで幾つかの報告がある⁴⁻⁶⁾。しかし、通常の巨視的な大きさでは従来の電磁モータに匹敵する性能を発揮することは難しく、実用化されたものはなかった。Sub-mmの微視的領域では静電型にも利点が出てくると考えられるため、今回われわれは、超小型アクチュエータの実現を目的として、新しい静電駆動リニアアクチュエータ（シリコン・マイクロ・アクチュエータ）を提案する。本報では、まずこのアクチュエータの構造の一例と、電界分布の計算に基づく駆動特性の計算結果について紹介する。さらに

製作および駆動特性の計測が容易な拡大モデル（拡大率100倍程度）を試作して、動作の確認と性能評価を行ったので報告する。

2. アクチュエータの構造と原理

図1と図2に示すように、このアクチュエータの基本的な駆動部は絶縁薄膜内に埋め込まれた短冊状電極と、絶縁膜の上に置かれた円筒電極からなっている。図2に位置検出電極として示した電極で円筒の位置を検出し、その位置に合わせて給電パッドから短冊状電極に電圧を印加すると、円筒（接地電極により接地されている）と短冊の間に静電引力が働く。円筒が静電力によって回転するにつれ、電圧をかける電極を切り替えていけば、回転が持続する。さらにこの円筒を幾つか並べた上にもう1枚基板を裏返しに重ねると、上下の基板が平行に移動するリニア・アクチュエータができる。現在考えているアクチュエータの概略の大きさは、図1に記入してあるとおり、短冊状電極の間隔が0.1mm、絶縁膜の厚さが全体で700nm、短冊電極の上で50—300nm、程度である。絶縁膜の破壊電界強度が1 MV/cm程度であるから、印加電圧としては5—30V程度になる。

3. アクチュエータの電界解析

ここでは以下の簡単化の仮定を置いて、解析的計算に

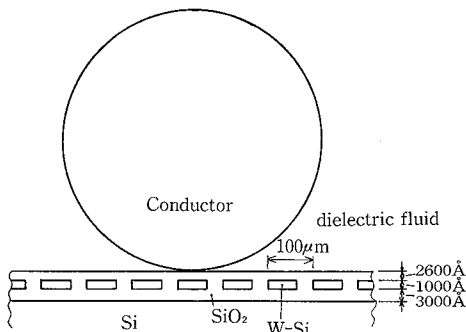


図1 アクチュエータの駆動部の横断面

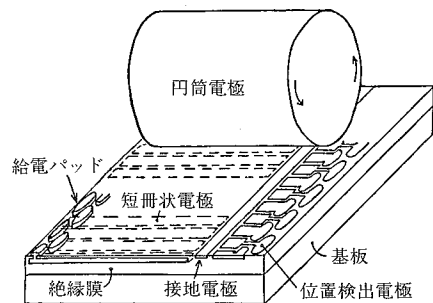


図2 アクチュエータの駆動部の見取り図

*東京大学生産技術研究所 第3部

**東京大学工学部

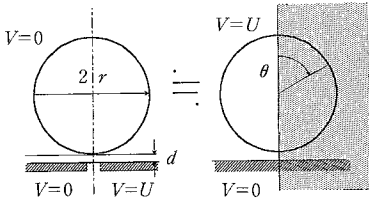


図3 円筒対平板配置による近似

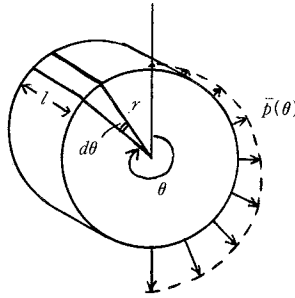


図4 円筒表面の応力の模式図

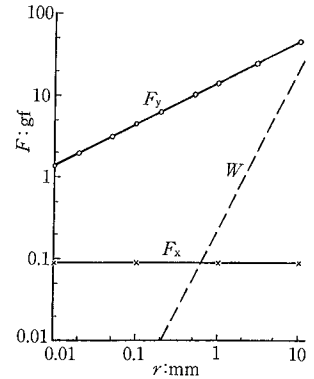


図5 駆動力の近似計算結果(絶縁膜厚50nm)

より電界分布の近似解を求める。

- (1) 短冊状電極と円筒とも十分長く、2次元電場として扱える。
- (2) 図3左に示すように、短冊状電極を二つの半無限平板で置き換え、その一方を高電位U、他方を接地電位にあるとする。また円筒電極は、ちょうど二つの電極の境界の真上にあるとする。
- (3) 絶縁薄膜と絶縁流体の誘電率は等しく、εである。
- (4) 図3左の電位Uの平板と円筒間の電界は、同図右の円筒対平板電極の右半分近似できる。なお、左半分には電界は生じないと考える。

以上の仮定のもとでは、問題は円筒対平板電極系の電界を求めることに帰着する。この電界は、複素等角写像か線電荷を用いた映像法で解くことができる⁷⁾。ここでは、等角写像による解を用いた。

W平面内での同軸円筒電極系は $Z = 1/w$ の写像でZ平面の円筒対平板電極系に変換されることを利用すると、 $\alpha = r/d$ として、電界 $E(\theta)$ は次の(1)式で与えられる。

$$E(\theta) = \frac{\sqrt{1+2\alpha}}{\alpha \{1+2\alpha \cos^2(\frac{\theta}{2})\} \ln\{(\sqrt{1+2\alpha}+1)^2/2\alpha\}} \cdot \frac{U}{d} \quad (1)$$

円筒表面に加わるMaxwell応力は、 $p(\theta) = \epsilon E(\theta)^2/2$ より求められる。さらに電界は導体表面と垂直であるから、応力は必ず円筒の中心から外に向かう方向に働くことに注意すると、円筒に働く力は図4に示す微小面積 $rld\theta$ に $p(\theta)$ を掛け、平板に水平と垂直の2成分に分けて積分したもので表される。この積分を実行した結果は、次の(2)式で与えられる。

$$F_x = \frac{\epsilon l U^2}{r [\ln\{(\sqrt{1+2\alpha}+1)^2/2\alpha\}]^2}, \quad F_y = \frac{\pi \alpha}{2 \sqrt{1+2\alpha}} F_x \quad (2)$$

ここで F_x は平板と平行な並進力を、 F_y はそれに垂直な圧着力を表している。図5は、 $d=50\text{nm}$ 、 $U=5\text{V}$ 、 $\epsilon^*=40$ 、 $l=10\text{mm}$ とし、 r の値を変えて F_x と F_y を計算した結

果である⁸⁾。 F_x は r によらずほぼ一定であること、 F_y はおおよそ r の1/2乗に比例して増加することがわかる。また図5の破線Wは鋼鉄製の中央円筒の重さである。静電力は表面に働く力であるため、形状が小さくなると重力や電磁力のような体積力に比べ支配的になる。

4. 動特性の解析

図6(a)に示すように、いくつかの円筒を並べた上にさらに平板を置き、この平板を直線的に駆動するときの動特性を計算してみよう。一つの円筒に着目して、同図(b)のように単純化し、そこに働く水平方向の力を考える。 F_x は上で計算した駆動力、 F_r は円筒と基板の間の摩擦力である。また、 F_r' は円筒と上に置いた平板の間の摩擦力で、これは平板に加わる駆動力の反作用と考えられる。円筒は基板上を滑らずに回転し、平板は円筒の2倍の速さで動くことに注意されたい。 J を円筒の慣性モーメントとすると、円筒の運動方程式は次のようになる。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_x}{M + 4m + J/r^2} \quad (3)$$

さらに円筒が薄肉のパイプであると、慣性モーメント J は Mr^2 に等しくなるので、(3)式は、次のように簡単になる。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_x}{2(M + 2m)} \quad (4)$$

式(4)を見ると、このアクチュエータ自体の等価的質量は、円筒の質量の2倍に可動平板の質量の4倍を加えたものになることがわかる。さらに外部負荷力 F がある場合には、式(4)の分母を $F_x - F$ とする必要がある。

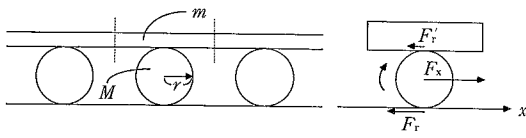
5. 拡大モデルの概要

以上の計算を確かめるために、拡大モデルを作って実験した。図7の写真のように、このアクチュエータのモデルは細長く分割された平板電極と、その上に置かれた

研究速報

円筒電極からなっている。平板電極としては、6mm厚の塩ビ板の表面にアルミテープを長方形に切ったものを張り、その上にPETシート(50 μ m厚 \times 2枚)と塩ビシート(100 μ m厚)を載せて絶縁したものを用いた。アルミテープの枚数に応じ、多電極モデル(図8(a))と2電極モデル(同(b))と呼ぶことにする。絶縁のため、アルミテープ間の隙間にシリコングリスを塗布し、ビニールシートとの間に気泡が残らないよう注意した。円筒電極はアクリル製0.5mm厚、長さ50mmで、直径25mmと50mmの円筒に、アルミ箔を巻き付けたものを用いた。円筒の重量はそれぞれ2.49gと4.96gである。ネオントラン

スとスライダックを用いた電源で、交流電圧を印加した。2電極モデルの場合は、アルミテープの片方を接地し他方を高圧とした。多電極モデルの場合は、図9に回路図を示すように電極をa, b, c, dの4相に分け、高電圧リレーにより順次電圧を印加していく方法を取った。リレーが開くと、10M Ω の抵抗を通じて電荷が消失し、その相は接地電位になる。円筒電極は細い裸線を架線とし、それを通じて接地した。多電極モデルと円筒電極を組み合わせた写真を図7に示す。



(a)複数の円筒電極とそれにより駆動される平板 (b)一つの円筒に着目したモデルと作用する力

図6 アクチュエータ動特性の計算モデル

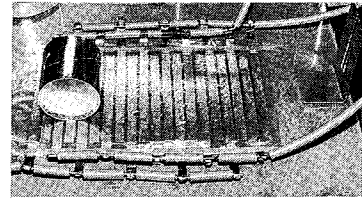


図7 静電アクチュエータ拡大モデルの写真

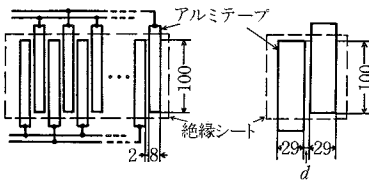


図8 平板上の電極の配置

(a)多電極モデル (b)2電極モデル

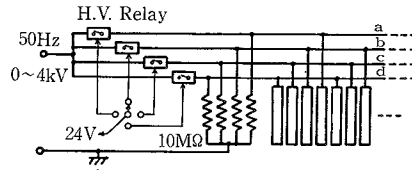


図9 電源回路

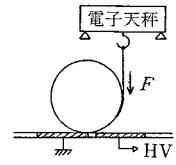
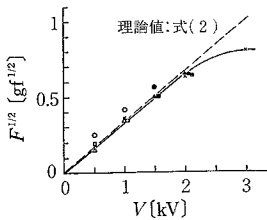
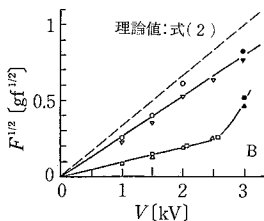


図10 駆動力測定方法

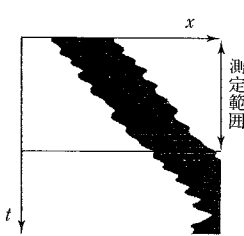


(a)円筒の半径50mm

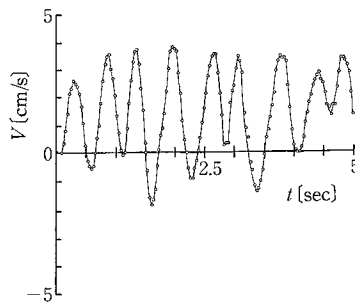


(b)同25mm

図11 印加電圧と力の関係

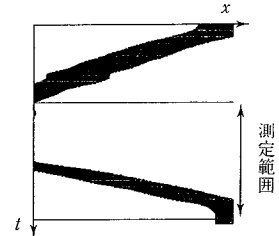


(a)流し写真

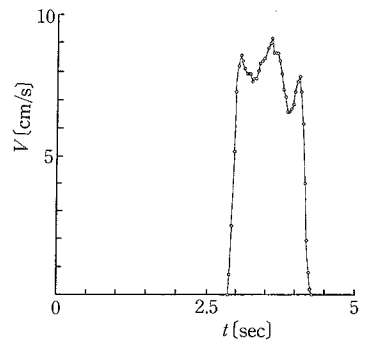


(b)画像処理により求めた速度

図12 印加電圧3.1kVでの円筒の動き (円筒の半径: 50mm)



(a)流し写真



(b)画像処理により求めた速度

図13 印加電圧5.3kVでの円筒の動き

研究速報

6. 実験結果と考察

まず 2 電極モデルに円筒電極を載せ、図10に示すように円筒電極を電子秤につないで動かないようにした状態で、駆動力を測定した。円筒電極に働く駆動力は、円筒表面のマックスウェル応力に比例するため、結局印加電圧の 2 乗と駆動力とが比例することになる。図11は、電圧と駆動力の関係を示したもので、縦軸は力の平方根で目盛っている。破線で記入した直線は、式(2)に基づいて求めた、駆動力の計算結果である。この結果を見ると、部分放電が発生する電圧以下では、力と、印加電圧の 2 乗とは比例関係にあり、計算値ともよく一致する値であることがわかる。円筒電極の直径が25mmと50mmとを比べると、大きいほうが同じ電圧に対してより大きな力を受けるようである。また、図11(b)で測定点が二つの直線上に分かれた理由は、円筒電極を置く位置の違いによると考えられ、円筒電極と平板電極の位置関係によりいわゆるトルク・リップルが存在することが推定される⁹⁾。また図中黒ベタ印で示した点では、円筒と絶縁シート表面の間で部分放電が生じていた。このような部分放電の発生している場合は、駆動力が低下したり、時間的に変動したりする現象が観察された。これらの変化の理由は明らかではないが、交流コロナによって生じた電荷が絶縁シート上に蓄積し徐々に緩和してゆくためと考えられる。

さらに多電極モデルを用いて、円筒電極を連続的に駆動することを試みた。直径50mmの円筒電極を用い、印加電圧を変えてビデオカメラで動作を記録した。さらにその画像を計算機で処理して、移動速度を求めた。図12は印加電圧を3.1kVとした場合である。電圧の切り替えは手動で行ったので、まず円筒がある相の電極から次に移動するのを確認し、それからスイッチを切り替えるまでに時間を要する。このため、円筒の動きはステップ的であり、一つの電極から次に移る際にはオーバーシュートがあった。図12(a)はこの動きを流し写真風に示したもので、同図(b)は移動速度を測定した結果である。瞬間最大速度は、4 cm/sであった。また速度曲線の傾きから

加速度を求めると、瞬間最大値が 0.43m/s^2 、各ステップごとの最大値の平均値が 0.25m/s^2 となった。この拡大モデルについて式(2)より求めた駆動力の値 $F_x=0.42\text{gf}$ および、円筒の重さ $M=5\text{g}$ 、平板は無し($m=0\text{g}$)を、式(4)に代入すると加速度の計算値として 0.42m/s^2 が得られる。実験値と計算値は、良い一致を示す。図13は5.3kVの場合で、約8 cm/sでかなり滑らかに駆動できることがわかる。

7. おわりに

新しい静電駆動アクチュエータの構造を提案し、その性能を決定する最大の要因である電界強度、駆動力および動特性の計算法について述べた。この結果、sub-mmの領域ではかなりの駆動力が期待できそうなことがわかった。さらに、静電型リニアアクチュエータの拡大モデルを製作し、実際に動作することを確認した。またこの拡大モデルを用いて、駆動力や加速度について上述の計算結果に良く一致する実験値を得た。この経験に基づいて本アクチュエータの小型化を進めていきたい。

末筆ながら、有益な御討論を頂いた本学原島文雄教授、生駒俊明教授、実験に関する御助言や機材のご援助を頂いた東京農工大学高橋雄造先生、本学工学部千葉政邦氏に厚く感謝する。
(1987年12月14日受理)

参 考 文 献

- 1) K. J. Gabriel, et al.: Proc. 4th Intern'l Conf. on Solid-State Sensors & Actuators, Tokyo, p. 853 (1987).
- 2) L. S. Fan, et al.: *ibid.*, p. 849.
- 3) 堀, 藤田: 電気学会論文誌D, 107巻, 6号, 649頁(昭和62年).
- 4) J. G. Trump: *Elect. Engin.*, 66, 525 (1947).
- 5) 工藤: 1980年静電気学会講演論文集, p137.
- 6) B. Bollee: *Philips Tech. Review*, 30, 178 (1969).
- 7) 増田, 河野訳「プリンツ: 電界計算法」朝倉書店, (1974).
- 8) 藤田, 面高: 昭和62年電気学会全国大会, 758.
- 9) H. Fujita, et al.: *IEEE Trans. Electron Devices*, to be published.