

論 文

梯子形静電リニアアクチュエータの 拡大モデルによる性能評価

有本 匡男*, 木村 雅秀*, 大橋 朝夫**

(1994年9月12日受理)

Performance Measurement of a Ladder-type Electrostatic Linear Actuator by Its Scale Model

Masao ARIMOTO,* Masahide KIMURA* and Asao OHASHI**

(Received September 12, 1994)

A new type of electrostatic linear actuator is proposed. It consists of a ladder-like slider, and a stator formed by horizontal parallel-plates with slim electrodes placed at regular intervals on the plates of the stator. The plates consist of an upper electrode and a lower one. As the slider is suspended by a fine wire between the electrodes, it can move freely along the electrode surface at the horizontal direction between the plates of the stator. To drive the slider, the positive potential is applied on the upper electrode by switching the voltage on the electrode one after the other, and the lower electrode is earthed. A scale model actuator was fabricated. The slider is approximately 0.9 mm thick, 70 mm wide, 200 mm long and 35 g in weight. Two plates form the stator at a distance of 3.0 mm. The behavior of slider was observed. We can control the position of the slider by switching potential on electrodes using electrostatic force between the slider and the stator. The slider moves from one electrode to another keeping pace with applied voltage on the electrode. The electrostatic force was measured, and the measured value was compared with the theoretical calculation. Both are nearly equal to each other when the slide electrode of an element is inserted in half of the stator electrode. The force depends on the slider position to the stator electrode.

1. はじめに

近年、半導体製造プロセスを用いた新しい機械加工技術が注目されている。この技術は半導体マイクロマシンニング¹⁾と呼ばれるもので、従来の方法では製作不可能だった超小型の機械システムを実現する。すでに、この技術によって、ミクロンオーダーの歯車、センサー、モーターといった部品が数多く作られている。このような技術的背景からマイクロマシンに関する研究がさまざま

な分野で行われている²⁾。

静電型のアクチュエータは、発生力は小さいが、小型化と集積化という優れた特徴を持っている³⁾。静電型では、基本的に表面力を利用するので、加工技術の限界まで小型化しても十分使用可能となる。また、そのような小型な装置を集積化することで、発生力を増大させることも可能となる。また、静電アクチュエータには、電極間に挿入された移動子に働く力を利用するタイプと、電極に働く力を利用するタイプとがある。ここで採用したタイプは、前者である。このタイプの静電アクチュエータは、移動子がその支持以外自由で長距離の移動に適していることや、移動子の材料として誘電体が使える点に特徴がある。

ここでは、短冊を並べた梯子形の移動子を、短冊状の電極を並べた固定子で狭んだ構成とし、電極に印加する電圧をタイミングをとってスイッチングすることによって連続直線駆動が可能な静電アクチュエータを考案し、その拡大モデルを製作して、その動作を確認すると共に

キーワード: 静電気、アクチュエータ、拡大モデル、マイクロマシン、静電アクチュエータ

* 長岡工業高等専門学校電気工学科 (940 長岡市西片貝町 888)

Department of Electrical Engineering, Nagaoka College of Technology, 888 Nisikatakai-machi, Nagaoka, 940 Japan

** 愛知工業大学電気工学科 (471 豊田市八草町八千草 1247)

Department of Electrical Engineering, Aichi Institute of Technology, 1247 Yachigusa, Yagusa-cho, Toyota, 471 Japan

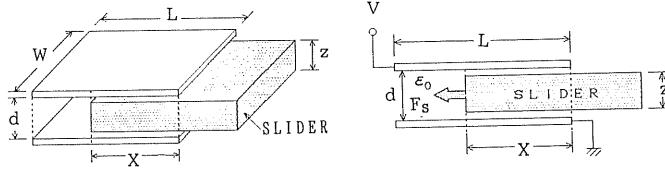


図 1 基本素子の構造

L : 電極の長さ, W : 電極の幅, d : 電極の間隔, z : 移動子の厚さ, X : 電極間に挿入された長さ, ϵ_0 : 真空の誘電率, F_s : 移動子に働く力, V : 固定子電極の印加電圧.

Fig. 1 Structure of an element.

L : Length of electrode, W : Width of electrode, d : Distance between electrodes, z : Thickness of slider, X : Length of slider inserted between electrodes, ϵ_0 : Permittivity of free space, F_s : Force acting on slider, V : Applied voltage on electrode.

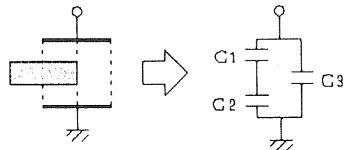


図 2 基本素子の等価回路

C_1 : 移動子と上部電極間の静電容量, C_2 : 移動子と下部電極間の静電容量, C_3 : 固定子電極間の静電容量.

Fig. 2 Equivalent circuit of an element.

C_1 : Capacitance of space between slider and upper electrode, C_2 : Capacitance of space between slider and lower electrode, C_3 : Capacitance of space between stator electrodes.

発生力を測定した。その結果、電極に印加する電圧を制御することにより、移動子がステップするように連続移動することを確認し、また、発生力は理論値に良く一致することを確認した。

2. 基本素子と連続駆動モデル

図1のように長さ $L[\text{m}]$, 幅 $W[\text{m}]$ の平行平板電極を $d[\text{m}]$ 間隔で向かい合わせ、この電極間に厚さ $z[\text{m}]$ の板状の移動子を $X[\text{m}]$ だけ挿入した状態を考える。これを基本素子と呼ぶことにする。移動子の材料を導体、電極間の媒質(空気)の誘電率を ϵ_0 とすると、この系の静電容量 $C[\text{F}]$ は、図2のように、3つの平行平板コンデンサー C_1, C_2, C_3 からなると考えて、

$$C_1 C_2 / (C_1 + C_2) = \epsilon_0 W X / (d - z)$$

$$C_3 = \epsilon_0 W (L - X) / d$$

よって、 $C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2) + C_3$

となる。また、この系の静電エネルギー U は、印加電圧を V とすると

$$U = (1/2) C V^2$$

U を X で微分したものが発生力 $F_s[\text{N}]$ になるから、

$$F_s = (dU/dX) = (1/2) V^2 \cdot (dC/dX)$$

$$= (1/2) V^2 \cdot \epsilon_0 W \cdot z / d / (d - z) \quad (1)$$

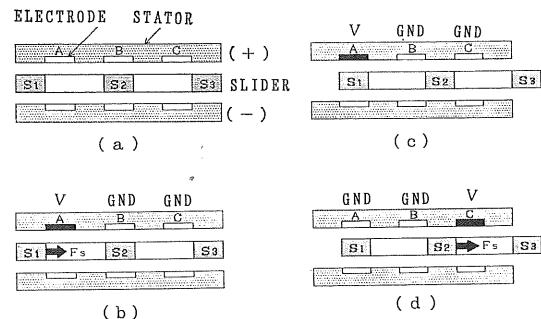


図 3 連続駆動の原理

A, B, C : 固定子の電極, S_1, S_2, S_3 : 移動子の電極, F_s : 移動子に働く力, V : 電極の印加電圧, GND: 接地された電極.

Fig. 3 Principal of continuous driving.

A, B, C : Electrodes on the stator, S_1, S_2, S_3 : Electrodes on the slider, F_s : Force acting on the slider, V : Applied voltage on the electrode.

となる。装置の構成が決まれば、 ϵ_0, W, d, z はすべて定数であるので、一定電圧 $V[\text{V}]$ のもとでは、発生力は一定となる。このように、発生力が位置 X によって変化しないので、制御が容易になる。また、電圧制御であるから、装置が簡単になる。

連続駆動を実現するためには、基本素子を水平方向に多数並べ、適当なスイッチングを行う必要がある。採用したモデルは図3(a)のように、基本素子を水平方向に3つ並べたものを単位としており、基本素子をそれぞれ A, B, C とすれば、図3(b)のように、 A だけに電圧を印加し、 B, C を接地したとき、移動子 S_1 には右方向の力が発生する。各移動子は互いに連結されているので、全体として右方向へ移動し、図3(c)のように、 S_1 が A に入りきったところで停止する。次に、図3(d)のように C へ電圧を印加し、 A を接地すると、移動子 S_1 には右方向の力が発生する。したがって、移動子全体は、さらに右方向へ移動する。結局、電極を適当なタイミング

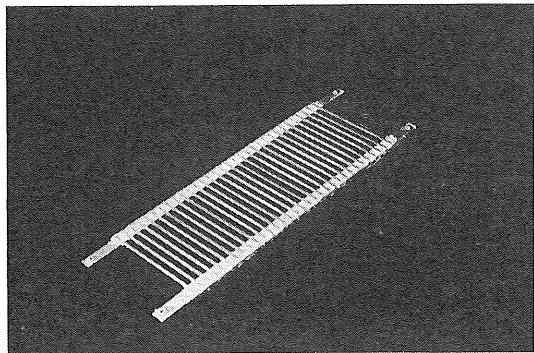


図 4 移動子の写真

Fig. 4 Photograph of a slider.

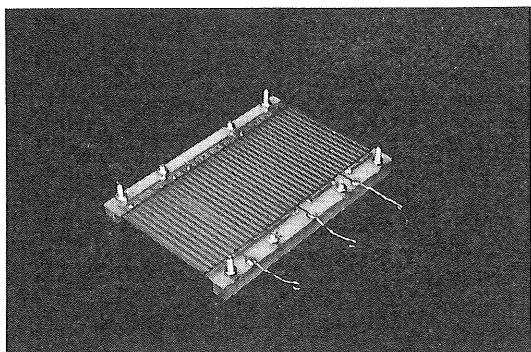


図 5 固定子のパターン化された電極構成の写真

Fig. 5 Photograph of patterned electrode on the stator.

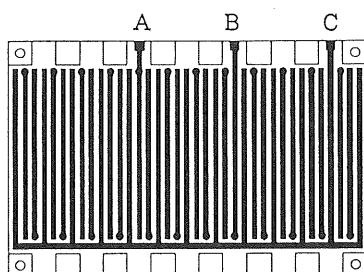


図 6 電極パターン

A, B, C : 電圧端子

Fig. 6 Pattern of stator electrodes.

A, B, C : Terminals for applied voltage.

で、 $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow B \dots$ とスイッチングすれば、移動子全体を連続的に動かすことができる。つまり、電極 A, B, C ……が「線路」にあたり、移動子 $S_1, S_2 \dots$ が「電車」に相当するわけで、電極の並びを長くすれば、アクチュエータの動作範囲はそれに応じて拡大できる。

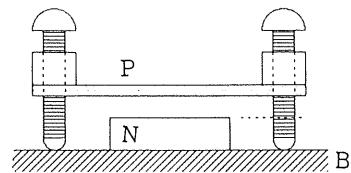


図 7 固定子の電極配置

P : +電極, N : -電極(接地), B : ベッド.

Fig. 7 Arrangement of stator electrodes.

P : Positive electrode, N : Negative electrode, B : Bed.

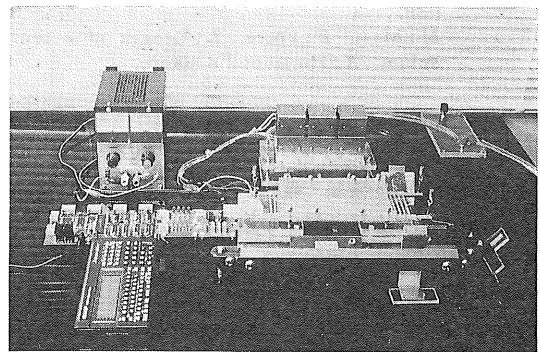


図 8 実験装置の全体写真

Fig. 8 Photograph of experimental setup.

3. 拡大モデルの製作と実験方法

図 4 に示すように、厚さ 1 mm で、 $2 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ のアルミ片を等間隔に並べ、それらを 2 本の梁（アルミ板）で支えて、移動子を製作した。図 5 に (+) 電極を示す。また、図 6 に電極パターンを示す。電極幅 L を小さくするほど、小型で力密度の大きいものができるが、ここでは、製作の都合上、 $L = 2 \text{ mm}$ とした。市販のポジ感光基板（片面ガラスエポキシ 100×150 ）を用いて、エッチングにより、パターンを形成した。次に、A, B, C の 3 極をそれぞれ束ねるために、各電極について、スルーホール結線を行う。原理的には、(-) 電極にも (+) 電極と同じパターンが必要であるが、ここでは、厚さ 1 cm の銅板を用いた。(+) 電極の基板には足（ビス）をついた。図 7 のように (+) 電極を置き、ビスを調整して、電極間隔 d を任意に設定することができる。(-) 電極と (+) 電極とをのせる台（ベッド）は水平方向、高さおよび水平度が任意に設定できる。

全体を構成したものを図 8 に示す。移動子の 4 隅にはフックを付け、細いタングステン糸で天井から吊るし、移動子を支持するときの摩擦力を軽減した。糸の長さは、できるだけ長い方がよいが、ここでは、設備の都合上、1.8 m とした。移動子には細い針を付け、移動子の

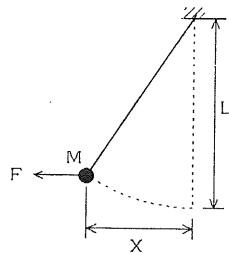


図 9 振り子に働く力とその振れ

M : 質量, F : 力, L : 振り子の長さ, X : 水平距離.

Fig. 9 Force acting a pendulum and its deflection.

M : Mass, F : Force, L : Length of a pendulum, X : Horizontal distance.

位置を決める時の指標とした。実際に動作させると、かなりの振動が生じたので、ダンパーを付加した。

連続的な動作を実験で確認するには、2章で述べたように、電極に印加する電圧を適当なタイミングで変化させる必要がある。本実験では、そのタイミングは、電極の動きを目視しながら手動で調整した。

4. 実験結果および考察

4.1 発生力

まず、基本素子において、移動子に発生する静電気力について検討する。図 9 に示すように、質量 $M[\text{kg}]$ の物体を長さ $L[\text{m}]$ の糸で吊るしたとき、水平方向に $X[\text{m}]$ ($X \ll L$) 変位して止まったとすると、そのとき物体に働いている水平方向の力 $F[\text{N}]$ は、

$$F = MX/L \quad (2)$$

で表される。従って、移動量 $X[\text{m}]$ を測定することで、(2)式により発生力を求めることができる。移動量 $X[\text{m}]$ の測定値は、右方向と左方向の平均で求めた。発生力が微弱で移動量が小さいので、 $1/2\text{ mm}$ のスケールをレンズで拡大して読み取った。ところで、電極の長さ L は 2 mm であるため、それ以上の移動量を測定するには、電極を動かさなくてはならない。これは、ベッドの水平移動で行った。また、その際、移動子が図 9 のように釣り合って停止する位置を図 10 のように、(a) 0%, (b) 50%, (c) 90% の 3 つの場合について設定した。印加電圧は 0.4 kV から 1.3 kV まで 0.1 kV ステップとした。なお、この場合、電極 A のみに電圧を印加した。

実験値を(1)式の理論値と比較するために、質量 M 、糸の長さ L 、電極間隔 d 、移動子の厚さ z をそれぞれ測定した。また、幅 W は電極と移動子の重なっている部分をいうので、(-)電極の幅を測定した。それぞれの値は、 $M=35.0\text{ g}$, $L=1.85\text{ m}$, $d=3.00\text{ mm}$, $z=0.905\text{ mm}$, $W=40.15\text{ mm}$ であった。

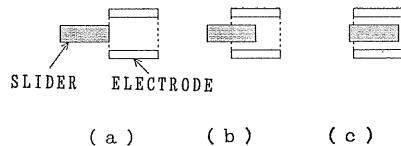


図 10 固定電極に対する移動子電極の位置

(a) 0% 位置, (b) 50% 位置, (c) 90% 位置.

Fig. 10 Positions of slider to stator electrode.
(a) 0% position, (b) 50% position, (c) 90% position.

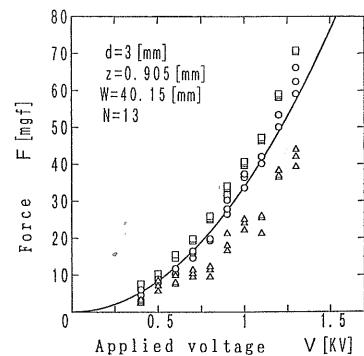


図 11 発生力と印加電圧との関係

□, ○, △: それぞれ 0%, 50%, 90% 位置における測定値, —: 計算値, N : 基本素子の数 (電極の数).

Fig. 11 Relationship between generating force and applied voltage.
□, ○, △: Measuring values at 0%, 50%, 90% position respectively, —: Calculation, N : Number of element (Number of electrode)

□, ○, △: Measuring values at 0%, 50%, 90% position respectively, —: Calculation, N : Number of element (Number of electrode)

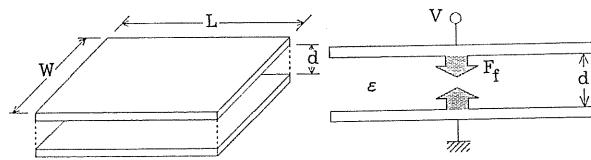


図 12 平行平板電極間に発生する垂直方向の力
\$L\$：電極の長さ, \$W\$：電極の幅, \$d\$：電極の間隔, \$\epsilon\$：誘電率, \$F_f\$：電極に働く力, \$V\$：印加電圧。

Fig. 12 Vertical force generating between parallel electrodes.
\$L\$: Length of electrode, \$W\$: Width of electrode, \$d\$: Distance between electrodes, \$\epsilon\$: Permittivity, \$F_f\$: Force generating on electrodes, \$V\$: Applied voltage.

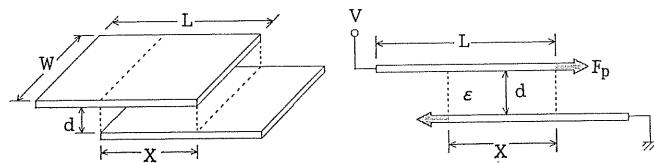


図 13 平行平板電極間に発生する水平方向の力
\$L\$：電極の長さ, \$W\$：電極の幅, \$d\$：電極の間隔, \$X\$：電極の重なった長さ, \$\epsilon\$：誘電率, \$F_p\$：電極に働く力, \$V\$：印加電圧。

Fig. 13 Horizontal force generating between parallel electrodes.
\$L\$: Length of electrode, \$W\$: Width of electrode, \$d\$: Distance between electrodes, \$X\$: Length of one above the other, \$\epsilon\$: Permittivity, \$F_p\$: Force generating on electrodes, \$V\$: Applied voltage.

であった。よって、電極長さなどをもっと縮小すれば、移動はスムースになると考えられる。

4.3 本モデルの評価

静電気力について考察する場合、平行平板電極構成を考えるのが簡単である。図 12 のように、長さ \$L[m]\$、幅 \$W[m]\$ の電極を、\$d[m]\$ 間隔で向かい合わせ、\$V[V]\$ を印加した場合、電極間の媒質の誘電率を \$\epsilon\$ とすれば、垂直引力 \$F_f [N]\$ は、

$$F_f = (1/2) \epsilon (V/d)^2 WL \quad (3)$$

となる。これは垂直引力型と呼ばれている。

また、図 13 のように、電極を水平方向に \$X[m]\$ だけずらした場合には、そのぞれを戻そうとする水平方向の力 \$F_p [N]\$ が生ずる。

$$F_p = (1/2) \epsilon (V/d)^2 Wd \quad (4)$$

これは水平引力型と呼ばれている。ここで、(3)式と(4)式を比較すると、

$$F_f/F_p = L/d$$

となる。通常の電極構成では \$L \gg d\$ であるから、\$F_f \gg F_p\$ となる。もし、動作範囲が小さくてもよい場合は、垂直引力型を使うべきである。しかし、その際には、\$F_f\$ が \$d\$ の関数になっている点に注意が必要で、制御が容易になるような構造上の工夫が必要であろう。垂直引力型は、制御の難しさや、動作範囲が小さいといふ欠点か

ら、あまり使われていない。今まで報告されている静電アクチュエータは、ほとんど水平引力型である。この型は、移動による発生力の変化がなく、動作範囲も大きく取れるので、設計しやすくなる。しかし、垂直引力型は \$F_f\$ が大きくなるという大きな利点があるため、最近になって見直されてきた。川村ら⁴⁾の考案した分布型静電マイクロアクチュエータでは、電極の形状を工夫し、積層化することで、動作範囲の拡大に成功している。また、加工技術を用いてシリコン表面に作られたアクチュエータ⁵⁾の場合は、長距離移動を必要としないので、垂直引力型が有利になるかもしれない。水平引力型の長所は、回転型³⁾が容易に実現できる点にある。もちろんリニア型のモーターもできるはずで、さまざまなタイプが考えられている⁶⁻⁸⁾。しかし、いずれも拡大モデルでの報告であり、微細加工技術で作った例は今のところない。結局、水平引力型の利点は、「動作範囲に制限の無いアクチュエータを作れること」と言えよう。これを利用した搬送システムや、ロボットの製作が期待される。

今回、製作した拡大モデルは、図 1 の原理を用いている。これを移動子型という。つまり、電極間に半ば挿入された物体（移動子）を中心に引き込む力を利用するのである。ここで、水平引力型と移動子型とを比較してみる。(1)式と(4)式とから、次式が得られる。

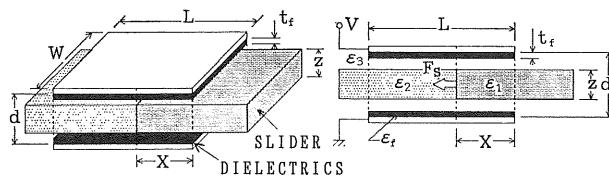


図14 誘電体を使用した静電アキュエータ
 L : 電極の長さ, W : 電極の幅, d : 固定子電極の間隔, z : 移動子電極の厚さ,
 X : 固定子電極間に挿入された移動子の長さ, ϵ_0 : 真空の誘電率, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_f$:
誘電率, F_s : 移動子に働く力, V : 固定子電極の印加電圧。

Fig. 14 Electrostatic Linear actuator using dielectrics.

L : Length of electrode, W : Width of electrode, d : Distance between electrodes, z : Thickness of slider, X : Length of slider inserted between electrodes, ϵ_0 : Permittivity of free space, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_f$: permittivity, F_s : Force acting on the slider, V : Applied voltage on the electrode.

$$F_p/F_s = (d-z)/z$$

この式において、 d を z に近づければ、 F_s のほうが有利になりそうだが、実際には、 F_p の方がはるかに有利であることがわかる。なぜなら、 $(d-z)$ の精度を出すことができるのであれば、(4)式の d を同程度に小さくすることが可能になるわけで、実際の比較は、(4)式の d を $(d-z)/2$ に置き換え、それぞれ、単位厚さ当たりの力で比較しなければならないからである。結局、

$$F_p : F_s = ((d-z)/2)^{-2} : zd^{-2}(d-z)^{-1}$$

よって、

$$F_p/F_s = 4d^2/z/(d-z) \quad (5)$$

となる。実際には、 $0 < z < d$ であるから、(5)式を z の関数として、(5)式の最小値を求めるとき、 $z=d/2$ のとき、 $F_p/F_s=16$ になる。つまり、 F_p の方が最低でも16倍も有利という結果である。従って、移動子型のアキュエータは、発生力が極めて弱いことがわかる。しかし、水平引力型は、電極を動かすわけで、長距離の移動には適していない。何らかの手段で、常に電極に電圧を供給することになるが、そこには必ず摩擦の問題が生ずる。これに対し、移動子型では、移動子を何らかの方法により、浮上させることができれば、摩擦の問題は全く発生しない。ただ、今のところそのような浮上技術は開発されていないようである。

また、移動子型では、移動子の材料として、誘電体が使える点に特徴がある。図14のように、移動子として、 X 点で誘電率が ϵ_1 から ϵ_2 へ変化するような物質を用いた場合を考える。なお、電極間に満たされている媒質の誘電率を ϵ_3 とし、電極には誘電率 ϵ_f 、厚さ t_f [m]の絶縁フィルムがついていると仮定する。この場合の発生力 F_s は、

$$F_s = (1/2)V^2 \cdot W(A_1 - A_2) \quad (6)$$

となる。ここに、

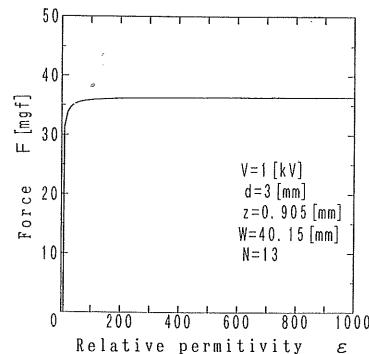


図15 発生力と移動子電極の比誘電率との関係

Fig. 15 Dependence of the relative permittivity of the slider electrode on the generated force.

$$A_1 = \epsilon_f \epsilon_1 \epsilon_3 / \{\epsilon_f \epsilon_3 z + 2\epsilon_1 \epsilon_3 t_f + \epsilon_1 \epsilon_f (d-z)\}$$

$$A_2 = \epsilon_f \epsilon_2 \epsilon_3 / \{\epsilon_f \epsilon_3 z + 2\epsilon_2 \epsilon_3 t_f + \epsilon_2 \epsilon_f (d-z)\}$$

である。なお、(6)式において、 $t_f=0$, $\epsilon_2=\epsilon_3=\epsilon_0$, $\epsilon_1=\infty$ の条件を入れると、(1)式と一致する。また、 $t_f=0$, $\epsilon_2=\epsilon_3=\epsilon_0$ の条件で、 $\epsilon_1=\epsilon_0 \epsilon$ とし、移動子の比誘電率 ϵ のみを変化させると、その発生力は図15のようになる。 $\epsilon=100$ 程度で、ほぼ導体レベルにまで上がる所以、比誘電率が100程度の軽量で加工しやすい材料が見つかれば、導体より有利に使えそうである。また、誘電率の異なる2種の誘電液体を分離させて使うこともできる⁹⁾。

5. まとめ

直線駆動型静電アキュエータの拡大モデルを作成し、手動のスイッチングで連続駆動を実現した。移動子は、電極の電圧をスイッチングするにつれて、ステップするように移動した。

発生する静電気力を測定し、電極端での電界の乱れを

無視した場合の計算値と比較した。両者は、移動子が固定子電極に半分挿入された状態の時、ほぼ一致した。実際には電極端で電界の乱れがあるので、測定される静電気力は固定子電極と移動子電極との相対的位置に依存することがわかった。

手動による動作が確認できたので、今後、マイクロコンピュータによりスイッチングのタイミングを制御すると共に、移動子に生じる振動の垂直成分の除去や移動子の支持方法の改善をはかり、拡大モデルの動作実験を行うと共にマイクロ化と集積化を行いたい。

参考文献

- 1) 藤田博之：生産研究，42 (1990) 664
- 2) 藤田博之：電気学会論文誌A，112 (1992) 959
- 3) 藤田博之：精密工学会誌，54 (1988) 1635
- 4) 川村秀司，南 和幸，江刺正喜：電気学会論文誌A，112 (1992) 994
- 5) 古畑智武，平野敏樹，K.J.Gabriel，藤田博之：電気学会論文誌A，112 (1992) 999
- 6) 藤田博之，面高秋人，原田昌信，田中秀郎，大谷淳一：生産研究，40 (1988) 152
- 7) 樋口俊郎，柄川 索：平成元年電気学会全国大会予稿集，No. 737, p. 6-191 (1989)
- 8) 菅原 淳，中村堅一：平成2年電気学会全国大会予稿集，No. 782, p. 7-150 (1990)
- 9) 壁井信之，宮崎俊幸，倉田 浩，小笠原幹，村山知寛，長竹和夫，土屋喜一：日本機械学会論文集C，57 (1991) 1924