

論 文

エレクトレット・モータの微小化, 集積化への試み

多田 泰芳^{*,1}; 我妻 真一^{*}

(2001年9月1日受付; 2002年2月8日受理)

An Attempt to Microminiaturize and Integrate Electret Motors

Yasufusa TADA^{*,1} and Sinichi AZUMA^{*}

(Received September 1, 2001; Accepted February 8, 2002)

A motor using electrets as active elements is called as an electret motor (EM). The EM is a sort of electrostatic motor. The theoretical investigation showed that the torque of the microminiaturized EM (rotor radius 0.3 mm) is about ten times stronger than that of the conventional variable capacitance motor of the same size, when they are driven by the voltage of 100 V. Based on the theoretical result, we have fabricated an expansion model of the rotational EM and two expansion models of a linear motor integrated with several linear EMs, as the first step to microminiaturize the rotational EM and to integrate with many microminiaturized linear EMs.

1. はじめに

静電モータはコイルや磁性体を必要とせず, その構造が極めて簡単なため超小型化に適しており, またそうすることにより電極間の耐絶縁電圧が増し, 単位体積・単位重量当たりの出力が著しく増加する。このようなことから, 種々の回転型静電マイクロモータがマイクロマシン用アクチュエータとして^{1,2)}, またリニア型静電マイクロモータを多数集積したりリニアモータが通常寸法の機械用アクチュエータとして^{3,4)}提案されている。

エレクトレットとは半永久的に電荷を保持している誘電体のことであり, これを能動部品として用いたモータがエレクトレット・モータ(EM)である⁵⁾。筆者は半径300 μmの回転子を持つ回転型EMを100 Vで駆動すると, その回転力は同寸法の単純なキャパシタ・モータのそれよりも1桁大きいという理論結果を得た⁶⁾。この結果を指針として, 回転型EMのマイクロ化, リニア型EMのマイクロ化と集積化を段階的に実現するため, まずmmオーダーの単一の回転型EMと集積化リニア型EMの拡大モデルを試作し, これについて検討したので報告する。

2. 基本回転型EMの構成

基本回転型EMは図1に示す2極の固定子一対と図

2に示す2極の回転子から成り, これを2極-2極EMと呼ぶ。

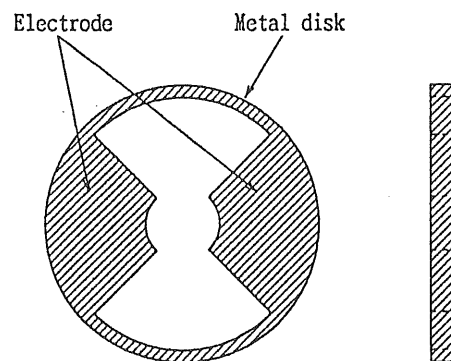


図1 2極の固定子一対のうちの1枚
Fig. 1 One of a pair of 2-pole stators.

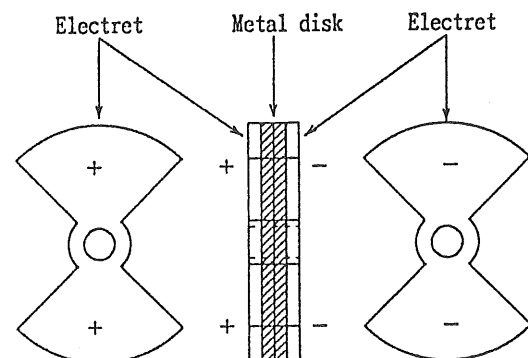


図2 回転子
Fig. 2 Rotor.

キーワード: エレクトレット・モータ(EM), 回転型EM, リニア型EM, 超小型化, 拡大モデル

* 群馬工業高等専門学校 (371-8530 前橋市 鳥羽町 580)
Gunma National College of Technology, 580, Toriba,
Maebashi 371-8530, Japan

¹ tada@elc.gunma-ct.ac.jp

このEMを交流方形波電圧で駆動する場合の断面の概略を図3に示す。

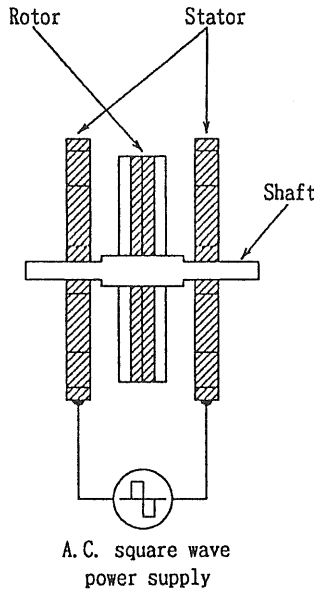


図3 交流方形波を加えた2極-2極EMの断面の概略
Fig. 3 Cross section of the 2 pole-2 pole EM applied A.C. square wave.

3. 回転型EMの回転子1極あたりに働くトルク

回転型EMの回転子1極あたりに働くトルクを求めるためのリニア型1極-1極EMモデルを図4に示す。

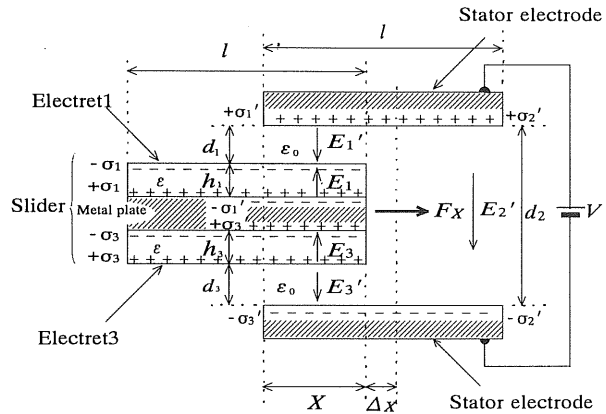
この図にガウスの法則、キルヒホッフの第2法則を適用し、エネルギー法を用いると、リニアEMモデルの移動子に働く紙面に垂直な単位長さ当たりの力 F_x [N/m] として

$$F_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_1 h_1 + \sigma_3 h_3}{\epsilon \cdot \delta} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r}{\delta} - \frac{1}{d_2} \right) \epsilon_0 V^2 + \frac{(\sigma_1 h_1 + \sigma_3 h_3)}{\delta} V \tag{1}$$

$$\delta = \epsilon_r (d_1 + d_3) + h_1 + h_3 \tag{2}$$

を得る。ここで ϵ はエレクトレットの素材であるテフロンFEPの比誘電率である。式(1)の第1項はエレクトレットの電荷のみによる力で、移動子を常に固定子内に引き込む働きをし、移動子の一方向への運動に寄与しない。第2項はエレクトレットから電荷を取り去り、単なる誘電体としたときに働く力であり、単純なキャパシタ・モータの移動子に働く力である。この力は印加電圧が正または負の直流方形波電圧のときに移動子の一方向の運動を生ずる。第3項はエレクトレットの電荷と印加電圧の両方に依存するEM特有の力である。この力は直流方形波電圧及び交流方形波電圧のいずれでも移動子の一方向の運動を生ずる。これらのことから、直流方形波によりステッピング動作させる場

合に単純なキャパシタ・モータに働く力は第2項の一分であるのに対し、EMに働く有効な力は第2項と3項の二成分であるのでより力が強いはずである。



- σ_1, σ_3 : surface charge densities of the electrets
- $\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3'$: surface charge densities on the stator
- E_1, E_3 : electric fields in the electrets
- E_1, E_2, E_3 : electric fields in the air gap
- ϵ : permittivity of the electret
- ϵ_0 : permittivity of the air
- X : displacement of the slider
- ΔX : virtual displacement
- F_x : force exerted on the slider per unit depth perpendicular to the paper plane

図4 リニア型1極-1極EMモデル
Fig. 4 Linear 1pole-1pole EM model.

実際に製作する回転型EMは、図4のモデルにおいて $h_1 = h_3 = h$ としたものに对应するので、その移動子の一方向運動に有効な力を F_g [N/m] とすると、式(1)と(2)より

$$F_g = \frac{1}{2} \left[\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r (d_1 + d_3) + 2h} - \frac{1}{d_2} \right] \epsilon_0 V^2 + \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)h}{\epsilon_r (d_1 + d_3) + 2h} V \tag{3}$$

を得る。

また、図4の移動子を同形同寸法のシリコン製移動子に置き換えたとき、それに働く力を F_s [N/m] とすると

$$F_s = \frac{1}{2} \left[\frac{\epsilon_{sr}}{(\epsilon_{sr} - 1)(d_1 + d_3) + d_2} - \frac{1}{d_2} \right] \epsilon_0 V^2 \tag{4}$$

となる。ここで ϵ_{sr} はシリコンの比誘電率である。

さらにこの式において $\epsilon_{sr} \rightarrow \infty$ としたときの力を F'_s [N/m] とすると

$$F'_s = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{d_1 + d_3} - \frac{1}{d_2} \right) \epsilon_0 V^2 \tag{5}$$

を得る。この力は図4の移動子を同形同寸法の金属製移動子に置き換えたときに働く力を意味する。

式(3)に対応する、回転子1極あたりに働くトルクを求めるための回転型2極-2極EMを図5に示す。

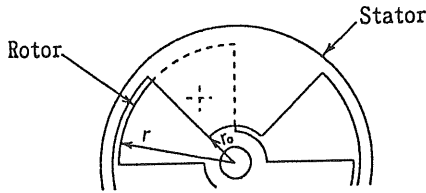


図5 回転型2極-2極EM
Fig.5 Rotational 2 pole-2 pole EM.

このトルクを T_g [N·m] とすると

$$T_g = F_g(r^2 - r_0^2)/2 \quad (6)$$

で与えられ, 式(4), (5)に対応するトルク T_s , T'_s も同様な式で与えられる。ここでトルク T_g , T_s , T'_s を

$$\begin{aligned} r &= 3.0 \times 10^{-4} \text{ m}, & r_0 &= 1.0 \times 10^{-4} \text{ m} \\ d_1 + d_3 &= 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}, & d_2 &= 4.4 \times 10^{-5} \text{ m} \\ h &= 1.2 \times 10^{-5} \text{ m}, & \sigma_1 = \sigma_3 &= 5.0 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2 \\ \epsilon_r &= 2.1, & \epsilon_{sr} &= 11.7 \end{aligned}$$

なる仕様の仮想マイクロモータモデルに対して理論的に求めた結果を図6に示す。この図より, $V=100$ [V] のとき T_g は T_s , T'_s よりも約一桁大きいことがわかる。

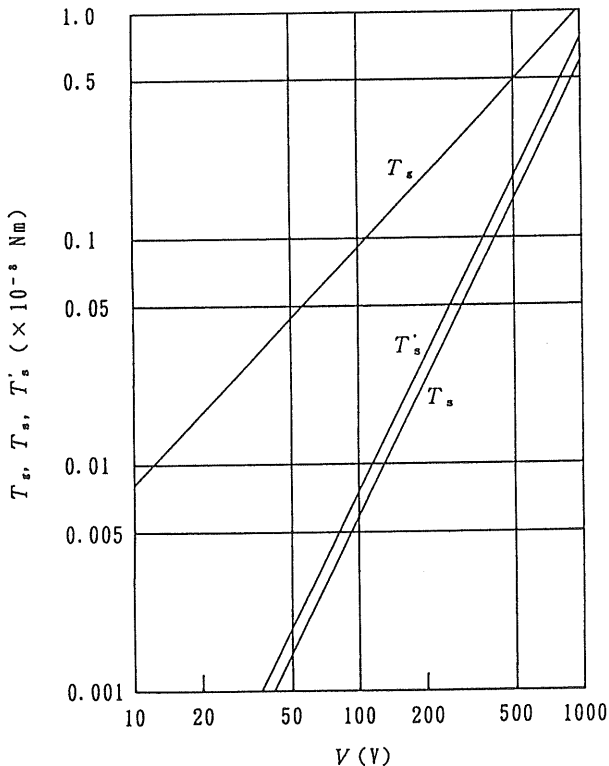


図6 トルク T_g , T_s , T'_s と電圧 V との理論的關係
Fig. 6 Theoretical curves of the torques T_g , T_s , T'_s vs. voltage V .

4. EM の動作原理

リニア EM モデルにおいて, 移動子の運動の向きを制

御するためには移動子と固定子の極数を変える必要がある。極数4の移動子と極数6の固定子から成るEMを1単位とし, 3相の直流方形波で駆動する場合の原理を図7に示す。移動子の上部のエレクトレットは(-), 下部は(+)の電荷を保持している。図7の固定子電極 A, B, C にはそれぞれ位相のずれた3相の直流方形波電圧が加わっている。

まず(1)の状態では固定子電極 A に電圧を印加すると移動子は(2)の状態まで引き込まれる。次に固定子電極 B に電圧を印加すると移動子は(3)の状態まで引き込まれる。以下同様にして C→A→B と電圧を順次印加すると移動子は紙面に向かって右から左へと移動する。また(1)の状態から電圧を B→A→C と順次印加すると移動子は逆方向に移動する。

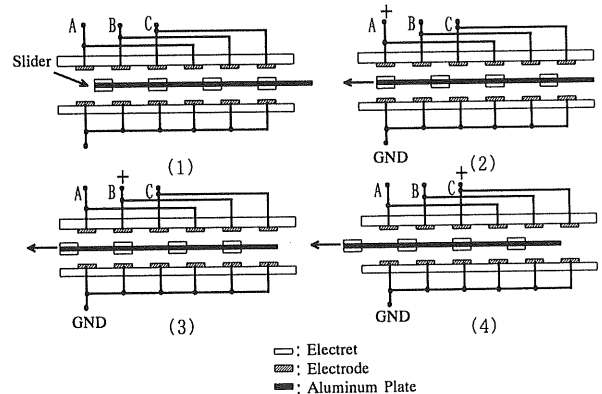


図7 EM の動作
Fig. 7 Operation principle.

5. 回転型EMの拡大モデル

試作した回転型EMの4極の回転子と6極の固定子を図8(a), (b)に示す。回転子の外径は3mm, 固定子の内径は0.9mmである。回転子は厚さ40 μ mのステンレス板と25 μ mのFEPテフロンフィルムをレーザーパルスで図8(a)のように型取りし, テフロンフィルムをコロナ放電により荷電してからステンレス板と張り合わせたものである。固定子は図8(b)の型のマスクをもちいて市販のフレキシブル・ポジ感光基板(50 μ mのポリイミド+35 μ mの銅箔)をホトエッチングしたものである。

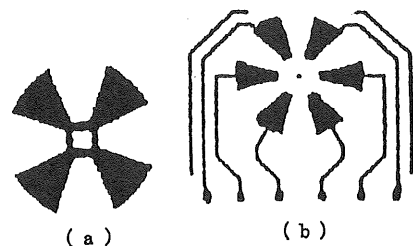


図8 回転型EMの拡大モデルの回転子(a), 固定子(b)
Fig. 8 Rotor(a), stator(b) of expansion model of rotational EM.

これらの回転子と固定子を用いて、回転子盤の両面を駆動するEMを組み立てることは困難であったので、回転子盤の片面だけを駆動する図9のようなEMを組み立てた。

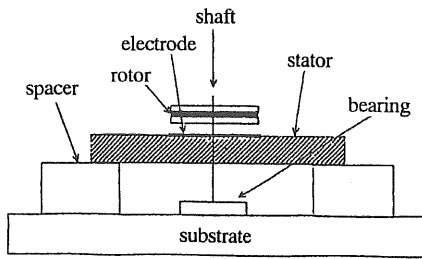


図9 試作回転型 EM の拡大モデル
Fig. 9 Fabricated expansion model of rotational EM.

実際に試作したEMの写真を図10に示す。

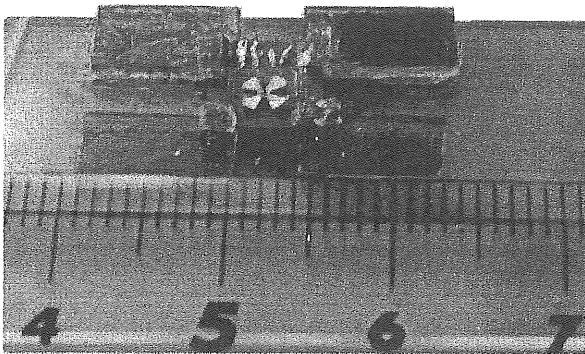


図10 試作回転型 EM の拡大モデルの写真
Fig. 10 Photograph of fabricated expansion model of rotational EM.

シャフトは直径 0.1mm のステンレス棒で、軸受け側の先端は尖らせてある。軸受けとしては厚さ 0.1mm のテフロンシートの表面をシャフトの先端で凹ましたものを用いた。回転子のエレクトレットと固定子電極との間隔は約 0.1~0.2mm である。固定子と基板の間は厚さ 1.0mm のスペーサーで隔てられている。固定子電極と電源との接続には直径 0.05mm のホルマル線を用いた。

上記 EM を振幅 400V、周波数 6Hz の 3 相直流方形波電圧を用いて同期回転させたところ、3 相直流方形波を加える順序により回転の向きを制御できることを確認した。しかし連続回転の途中で回転子のシャフトが外れる事態が生じた。組立精度に問題があった為と思われる。

6. 集積化リニア型EMの拡大モデル1

試作した集積化リニア型EM拡大モデル1の移動子と固定子を図11, 12に示す。

移動子の基板は放電加工により梯子形に加工した 0.25mm 厚のアルミニウム板である。この片面だけに

0.025mm 厚のテフロン FEP フィルムを貼り、コロナ放電によってマイナス電荷を荷電しエレクトレット化した。

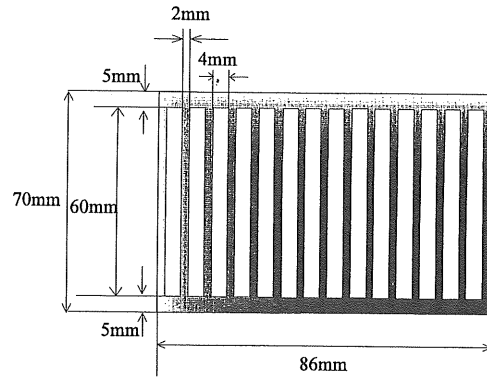


図11 集積化リニア型 EM 拡大モデル 1 の移動子
Fig. 11 Slider of expansion model 1 of integrated linear EM.

固定子はポジ感光基板 (片面ガラスエポキシ) をフォトエッチングすることにより製作した。固定子電極の寸法は 2mm×60mm、電極のピッチは2mmで計32個の電極を設けてある。

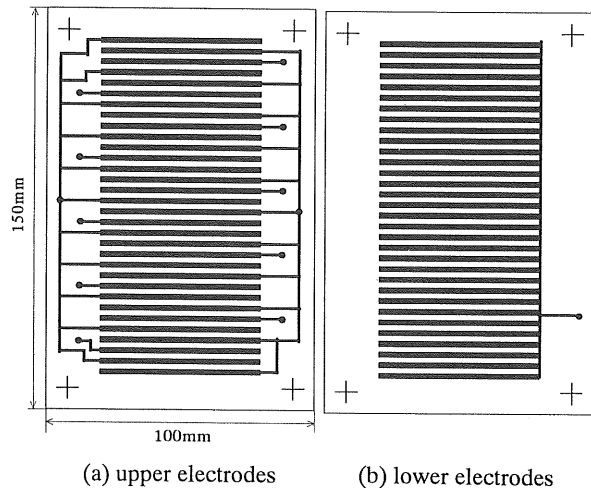


図12 集積化リニア型EM拡大モデル 1 の固定子
Fig. 12 Stator of expansion model 1 of integrated linear EM.

集積化リニア型 EM 拡大モデル 1 の立体構造の概略を図 13 に示す。

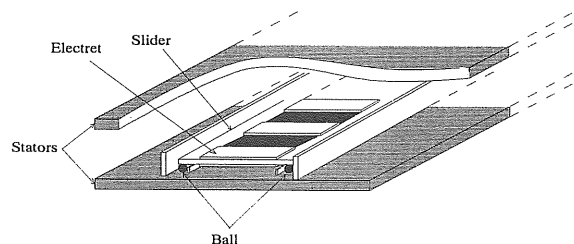


図13 集積化リニア型 EM 拡大モデル 1 の立体構造
Fig. 13 Three-dimensional structure of expansion model 1 of integrated linear EM.

移動子と固定子の間には摩擦低減のためベアリングボールを挿入し, 電極間隔を2.3mmに調整した。以下に拡大モデル1における各部のパラメータの値を示す。

$$d_1 = 1.025 \text{ mm}, d_2 = 2.3 \text{ mm}, d_3 = 1 \text{ mm}$$

$$h_1 = 25 \mu\text{m}, h_3 = 0, s_1 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$$

$$\text{モータ体積} : 100\text{mm} \times 150\text{mm} \times 5\text{mm} = 7.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

有効体積(固定子電極空間の体積) :

$$60\text{mm} \times 86\text{mm} \times 2.3\text{mm} = 1.12 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

移動子重量 : 1.58 gf

7. 集積化リニア型EMの拡大モデル2

集積化リニア型EMの微小化をさらに進め, 拡大モデル1の全体の体積を約25%縮小した拡大モデル2を製作した。その移動子と固定子を図14, 15に示す。

この移動子の製作方法は拡大モデル1と同様で, 片面のみにエレクトレットを貼ってある。

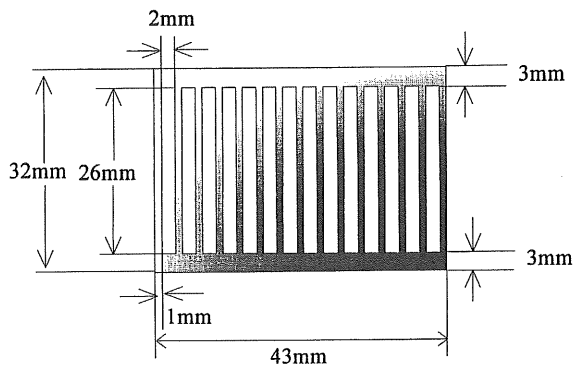


図14 集積化リニア型EM 拡大モデル2の移動子
Fig. 14 Slider of expansion model 2 of integrated linear EM.

この固定子の電極パターンは拡大モデル1の固定子と同様であり, その製作方法も同じである。1mm×26mmの電極を1mmの電極ピッチで計42個設けてある。上下の固定子電極間隔は1mmに設定した。

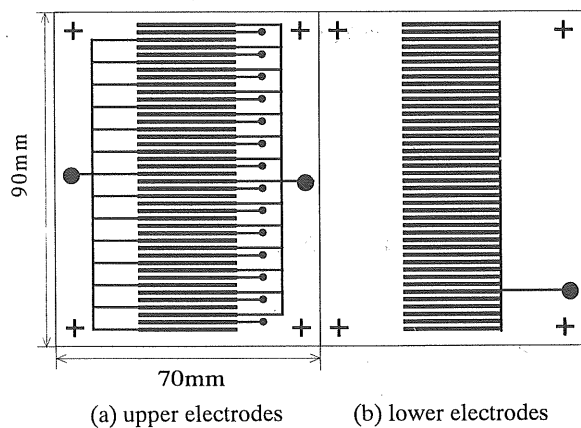


図15 集積化リニア型EM 拡大モデル2の固定子
Fig.15 Stator of expansion model 2 of integrated linear EM.

以下に, 拡大モデル2における各部のパラメータの値

を示す。

$$d_1 = 0.225 \text{ mm}, d_2 = 1 \text{ mm}, d_3 = 0.5 \text{ mm}$$

$$h_1 = 25 \mu\text{m}, h_3 = 0, s_1 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$$

$$\text{モータ体積} : 70\text{mm} \times 90\text{mm} \times 3\text{mm} = 1.89 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ (拡大モデル1の1/4)}$$

$$\text{有効体積} : 26\text{mm} \times 43\text{mm} \times 1\text{mm} = 1.12 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ (拡大モデル1の1/10)}$$

移動子重量 : 0.35 gf

8. 集積化リニア型EM拡大モデルの推力測定と結果

測定装置の概略を図16に示す。移動子の両端に付け

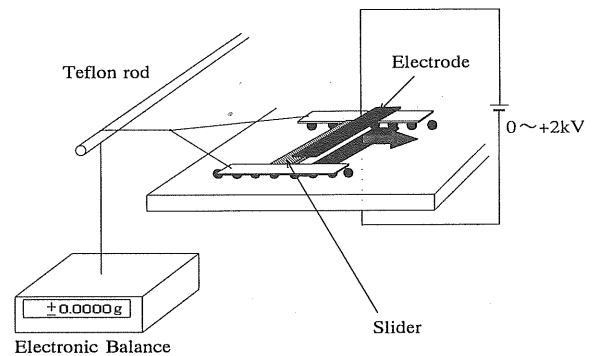


図16 集積化リニア型EM 拡大モデルの推力測定装置
Fig. 16 Set up of expansion model of integrated linear EM.

た絹糸の中心から別の一本の絹糸を同じレベルで水平に伸ばし, テフロン棒により方向を垂直に変え, その先端を電子天秤に接着し移動子に働く推力を測定した。拡大モデル1と2についての測定結果を図17~18に示す。

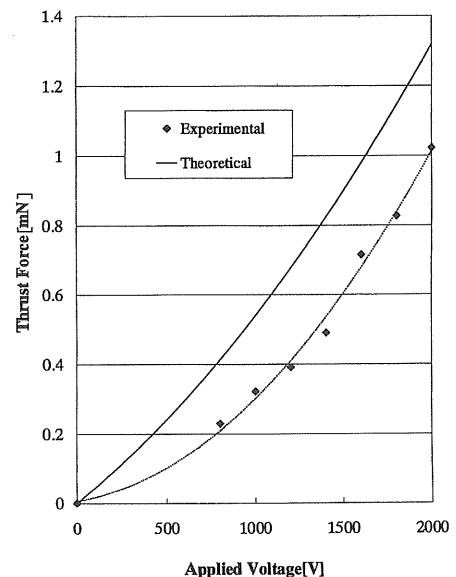


図17 集積化リニア型EM 拡大モデル1の推力
Fig. 17 Thrust force of expansion model 1 of integrated linear EM.

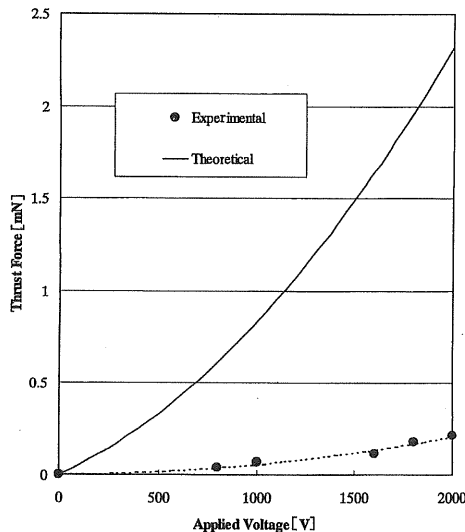


図 18 集積化リニア型 EM 拡大モデル 2 の推力
Fig. 18 Thrust force of expansion model 2 of integrated linear EM.

印加電圧が 2000V の時、図 17 の拡大モデル 1 では 1.02mN の推力を、図 18 の拡大モデル 2 では 0.21mN の推力を発生した。図 17 と 18 における理論値と実験値との違いは、主として理論計算において、平行平板電極間の電界を全域で平等電界として扱ったこと、および摩擦抵抗を考慮しなかったことに依る。

拡大モデル 1 と 2 の推力を単位体積当たりで比較すると図 19 のようになる。単位体積当たりの推力の算出には有効体積を用いた。

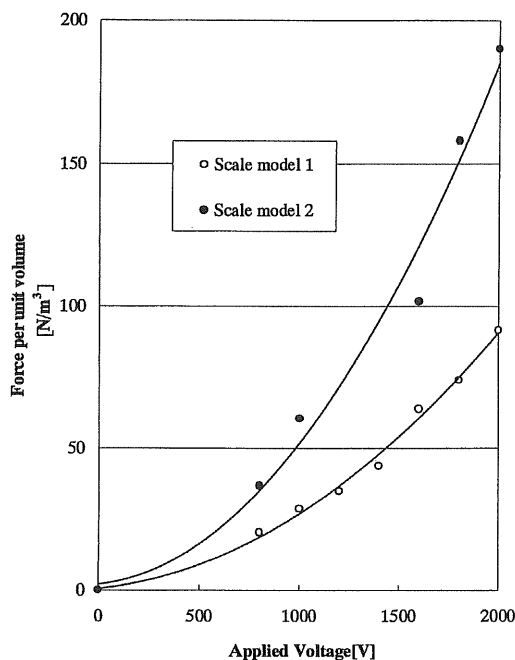


図 19 集積化リニア型 EM 拡大モデル 1 と 2 の単位体積当たりの推力
Fig. 19 Thrust forces volume density of expansion models 1 and 2 of integrated linear EM.

この図19は集積化リニア型EMの構成単位をより小さくすればするほど単位体積当たりの直線力が増加すること、同じ外径寸法なら構成単位がより小さいほど直線力がより大きくなることを示している。

9. 集積化リニア型EM拡大モデルの駆動実験

拡大モデル1の駆動実験は手動により2000Vの直流電圧をA, B, Cの順に印加していくことで行い、移動子がステップ動作すること、電圧の印加順序を逆にすると逆方向に動作することを確認した。

拡大モデル2の駆動実験は周波数1~25Hz, 振幅350Vの3相直流方形波電圧を用いて行い、移動子を連続駆動させること、駆動方向を変えられることができた。周波数25Hz時のモータの同期速度は、25mm/sである。

10. まとめ

回転型EMをマイクロ化しマイクロマシン用のアクチュエータとするための第一段階として、回転子の外径がmmオーダーの回転型EMの拡大モデルを試作し、3相直流方形波電圧により正転、逆転の基本的な動作をさせることができた。しかし、その組立を双眼顕微鏡の視野内で手作業により行ったので、組立精度が良くなかったためシャフトがはずれやすく長時間の連続回転はできなかった。

リニア型EMの構成単位をマイクロ化したものを多数集積して、通常寸法機械用の軽量かつ強力なりニア型アクチュエータとするための第一段階として、構成単位がmmオーダーの集積化リニア型EMの拡大モデル1と2を試作し、それらの推力を測定し比較することにより、モータを小型化するほど単位体積当たりの推力が増加することを確認できた。

回転型EMおよび集積化リニア型EMとも、本来の目的に到達するためには製作技術を含めて検討する必要がある。

参考文献

- 1) M. P. Omar, M. Mehregany and R. L. Mullen: J. Microelectromech. Syst., **1** (1992) 130
- 2) U. Beerschwinger, N. G. Mlne, S. J. Yang, R. L. Reuben, A. J. Samgster and H. Ziad: J. Microelectromech. Syst., **3** (1994) 162
- 3) 新野俊樹, 樋口俊郎: 静電気学会講演論文集'95, p.151, 静電気学会 (1995)
- 4) T. Niino, S. Egawa, H. Kimura and Y. Higuchi: *Micro Electro Mechanical System Workshop*, p.130, IEEE, Oiso (1994)
- 5) Y. Tada: IEEE Trans. Elect. Insul., **28** (1993) 402
- 6) Y. Tada: Ph.D. Thesis: *Fundamental Characteristics and Theoretical Analyses of Electret Electromechanical Energy Transducers Using Modern Polymer Film Electret*, Science Univ. of Tokyo (1996)