

論 文

エレクトレットスイッチ

佐藤 隆一*, 高松 俊昭**

(1983年12月21日受理)

An Electret Switch

R. SATO* and T. TAKAMATSU**

(Received December 21, 1983)

Teflon FEP (copolymer fluorinated ethylene propylene) films with a thickness of 12 μm was polarized by applying a corona discharge at 140°C. Electrostatic attractive force, F_a , and repulsive force, F_r , caused by induction due to surface charge on the electrets were measured as a function of stroke using (1) a vertical movement type and (2) a hinge movement type. The decay of surface charge on the electrets metallized on one side was slower than that on the unmetallized electrets. The value of F_r using the hinge movement type was obtained to be about 0.35 g weight when the surface charge of the electret was $1.8 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$, the electrode area = 4.8 cm^2 , the air gap = 0.1 mm and the operational voltage = 100 V, respectively. The value of F_r was about 0.25 g weight at the same experimental condition. The ratio of F_a to F_r was always over one and decreased with increasing the V_C and reached a minimum when the V_C was about 150 V. On the basis of the results, a new type of electret switch was designed.

1. まえがき

近年、省エネルギー化が進むなかで低い消費電力で動作するスイッチの開発、研究が盛んである。これまで、スイッチ駆動の主流は電磁式¹⁾のものであるが、この方式による低消費電力化はすでに限界に達しようとしている。そこでわれわれはさらに低い消費電力のスイッチを開発するため静電気力を使ったエレクトレットスイッチの実用化に取り組んできた。すでにエレクトレットスイッチの開発研究に関する報告が発表されている²⁾。Perino らによれば、駆動電圧 100 V、駆動エネルギー 1 μJ のスイッチを試作し、スイッチの駆動方式と吸引力についての考察が述べられている。

この報告はポリマエレクトレットフィルムの作製と、それをスイッチの駆動源に用いた場合の吸引力および反発力について基礎実験を行ない、それらの結果について検討を加えたものである³⁾。

2. 実験

2.1 試料

厚さ 12 μm の FEP-テフロン（テトラフルオロエチレン-ヘキサフルオロプロピレン共重合体）フィルムの片面に (Ni-Cr) 合金を真空蒸着法によってめっきしたあと、フィルムの腰を強くするためめっきした面に厚さ 10~50 μm のアルミ箔をエポキシ樹脂接着剤で貼り付けた。フィルムのめっき面を一方の電極として利用した。

2.2 コロナ荷電法

フィルムのめっき面を接地し、これを 140°C に加熱したあと、フィルム表面垂直上方 10 mm の位置に針状電極を設置して両電極間に +9 kV または -9 kV の直流電圧を加えてコロナ放電を行なった。5 秒間フィルム面にコロナ放電したのち 55 秒間休止する一連の動作を 5 回繰り返した。

2.3 エレクトレットによる力

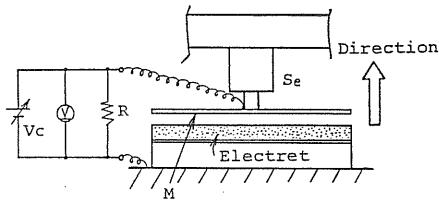
エレクトレットの静電気力とストローク（可動電極の移動距離、ヒンジ動作方式においては可動電極先端部の移動距離）の関係を、(1)図 1 に示す垂直動作法および、(2)図 2 に示すヒンジ動作法を用いて、駆動電圧 V_c 、およびエレクトレット表面電荷密度 σ などを変えて測定した。静電気力は引張り試験器 (Se) のロードセル（力センサ）に可動電極を結合させて測定した。表面電荷密度は静電

* 立石電機株式会社 リレー事業部 (617 長岡市下海印寺伊賀寺 20)

Relay Division, OMRON TATEISI ELECTRONICS Co., 20, Igadera, Shimokaijinji, Nagaoka, 617 Japan

** 理化学研究所 (351-01 和光市広沢 2-1)

The Institute of Physical and Chemical Research, 2-1, Hirosawa, Wako, 351-01 Japan



V_c: Operating voltage, R : Discharge resister, M : Movable electrode, Se : Sensor.

図1 垂直動作方式による力の測定

Fig. 1 Measurement of force by a vertical movement type.

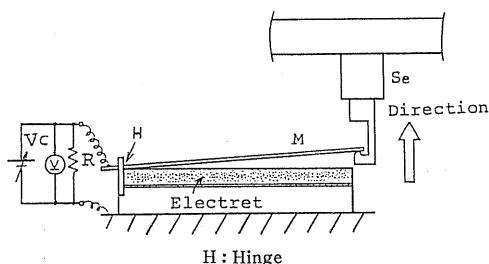


図2 ヒンジ動作方式による力の測定

Fig. 2 Measurement of force by a hinge type

誘導法を用いた理研式表面電荷密度測定器で測定した。

まず、可動電極がエレクトレット表面に接触している状態をストロークのゼロ点とし、ストロークを広げる方向に電極を平行移動させたときの力とストロークの関係を測定した。この場合、駆動電圧がゼロのときの力を基準とし、駆動電圧を種々変えて加えたときの力の値から基準値を差し引いたものを吸引力または反発力として取り扱った。

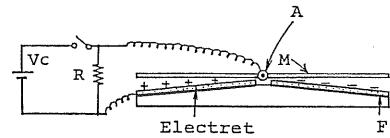
2.4 エレクトレットスイッチの試作

図3に試作したエレクトレットスイッチのモデルを示す。外部からの振動や衝撃に対して安定な動作をさせるため、バランスアマチュア構造にしている。エレクトレットフィルムはプラス荷電したものとマイナス荷電したもの2種類を組み合わせ、吸引力と反発力による合成力でスイッチを開閉する構造にした。駆動電圧V_cは可動電極とエレクトレットフィルムの下部電極の間に加えた。図4(A)および(B)はヒンジ動作方式によるエレクトレットスイッチの実物の写真である。大きさは高さ6.5mm、幅45mm、長さ85mmである。

3. 結 果

3.1 エレクトレットの表面電荷

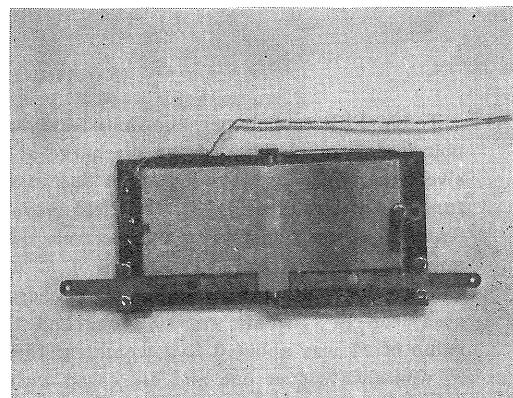
1) コロナ荷電によるポリマーフィルム表面への堆積電荷量は荷電時間が5秒以内で飽和し、その飽和荷電量は $(1\sim2)\times10^{-8} C/cm^2$ であった。



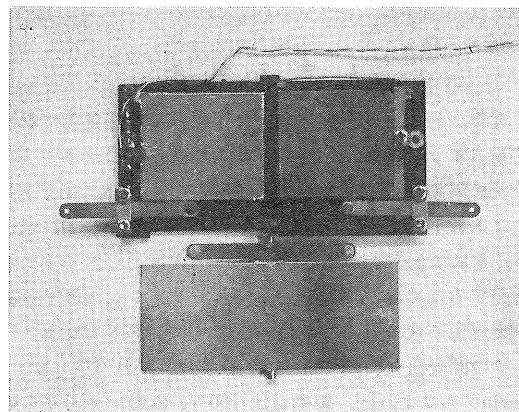
A : Axis of rotation, F : Fixed electrode.

図3 エレクトレットスイッチの模型

Fig. 3 A model of electret switch.



(A) External appearance



(B) Open state

図4 エレクトレットスイッチの写真

Fig. 4 Photograph of electret switch.

2) 堆積電荷の寿命は荷電の極性によって異なりプラス荷電よりマイナス荷電のほうが長くなっている。

3) 荷電回数が1回の場合と5回の場合について、荷電後1,000時間経過したあとの電荷減衰⁴⁾の時定数τを比べると前者は 2.1×10^7 秒であるのに対し、後者は 5.9×10^7 秒となり後者のほうが前者よりも約3倍長くなっている。

4) 片面めっきしたフィルムとめっきなしのフィルム表面に堆積した電荷の減衰速度を200時間後について比べると前者はほとんど減衰が見られないのに対して後者

表1 環境特性

Table 1 Summary of environmental test.

Condition	Residual surface charges (%)
Cold test	
Temp. -55°C	
Time 72 h	68
Heat test	
Temp. 85°C	
Time 16 h	19
Damp heat test (Steady state)	
Temp. 40°C	
R.H. 90~95%	
Time 48 h	44

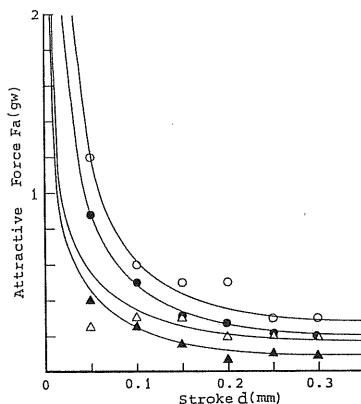


図5 垂直動作方式とヒンジ動作方式による吸引力とストロークの関係

Fig. 5 Relation between attractive force and stroke by the hinge type and the vertical type.

は 1.5×10^6 秒の時定数が算出された。

5) 実際の使用状態を考慮して表面電荷の安定性を温度や湿度などの条件を変えた環境試験を行ない、それらの結果を表1に示した。表面電荷は耐寒試験 (-55°C) や相対湿度 (95%) の霧氷気中ではあまり減少しないが、耐熱試験 (85°C) では大分消失していた。

3.2 吸引力と反発力

図5はヒンジ動作方式および垂直動作方式における吸引力とストロークの関係を示す。電極の対向面積(S)は 4.8 cm^2 、エレクトレットの表面電荷密度は $1.8 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$ であった。同一条件下でヒンジ動作方式のほうが垂直動作方式の場合よりも大きな吸引力を示している。

図6はヒンジ動作方式での反発力とストロークの関係

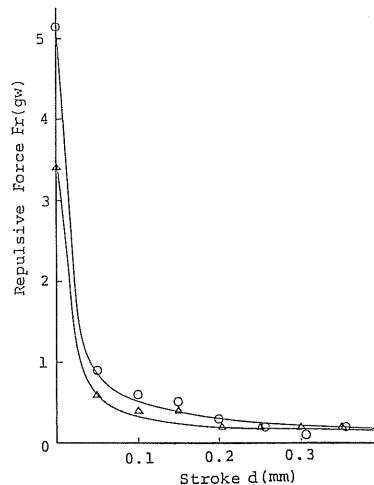
Vc : ○ 200 V, △ 100 V, S : 4.8 cm².

図6 ヒンジ方式での反発力とストロークの関係

Fig. 6 Relation between repulsive force and stroke by the hinge.

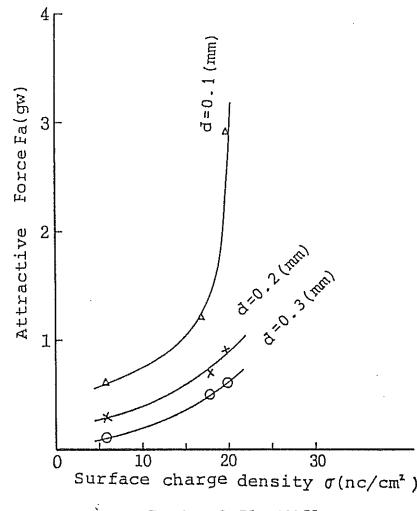
S : 23 cm², Vc : 100 V

図7 エレクトレット表面電荷密度と吸引力の関係

Fig. 7 Relation between surface charge density on the electret and attractive force.

を示す。その表面電荷密度は $1.7 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$ であり、エレクトレットの静電気力による吸引力および反発力はエレクトレット表面からの距離の2乗にはほぼ反比例している。

図7は各ストローク(d)における表面電荷密度(σ)と吸引力(F_a)の関係を、図8は各 d における F_a と駆動電圧(V_c)の関係を、図9は F_a と S の関係を示した。なお反発力(F_r)についての σ , V_c , S との関係は F_a

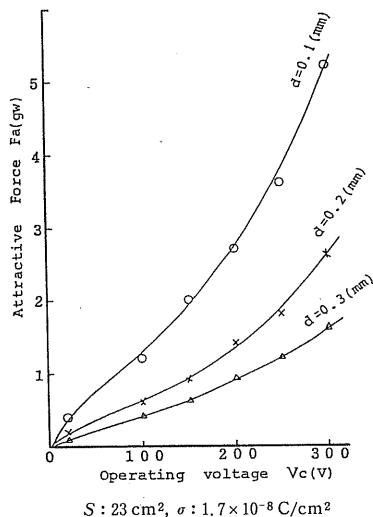


図 8 駆動電圧と吸引力の関係

Fig. 8 Relation between operating voltage and attractive force.

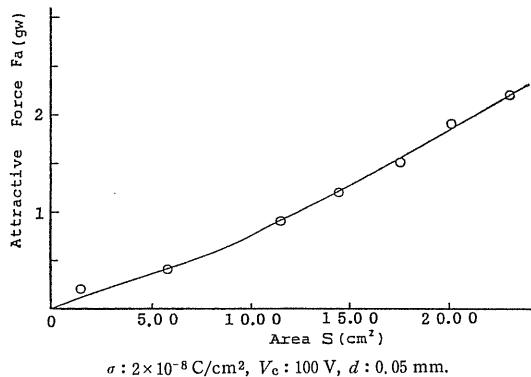


図 9 電極の対向面積と吸引力の関係

Fig. 9 Relation between facing area of electrode (S) and attractive force.

の場合とだいたい同じ傾向を示している。 F_a および F_r はいずれも σ , V_c および S の増加に伴い増加している。

F_a と F_r の大きさは同一条件のもとでは差がある。そこで $\sigma = 2 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$ の下でこの比率 $k (= F_a / F_r)$ を各 d ごとに V_c に対してプロットすると図 10 に示すように約 150 V 付近で極小値が得られた。

3.3 エレクトレットスイッチ

表面電荷密度 $\sigma = -1.5 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$ と $\sigma = 2 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$ の極性を異にする 2 枚のエレクトレットフィルムを用いたスイッチの基本特性を表 2 に示した。スイッチの駆動端子間には放電抵抗を附加し、エレクトレットの表面電荷と駆動電圧によって可動電極に誘導された電荷を放電させた。放電抵抗の値を大きくすると消費電力が小

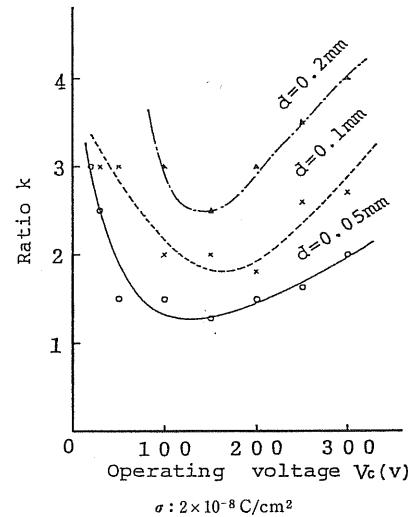
図 10 駆動電圧と k の関係Fig. 10 Relation between operating voltage and k ($= F_a / F_r$)

表 2 エレクトレットスイッチの特性

Table 2 Character of an electret switch.

Character	Value
Pick-up voltage (V)	244
Drop-out voltage (V)	46
Contact resistance (mΩ)	150
Contact force (gw)	1
Contact gap (mm)	0.15
Operate time (ms)	17
Release time (ms)	27

くなるが、復帰時間が長くなる。この試作品では定格駆動電圧 300 V で消費電力を 20 mW に設定した。

4. 考 察

4.1 吸引力 (F_a) と反発力 (F_r)

図 11 に示すような二層誘電体モデルを用いると、空隙 (ストローク) d の電界 E_1 は(1)式で与えられる。

$$E_1 = -(\sigma t / \epsilon_2 + V_c) / (d + \epsilon_1 t / \epsilon_2) \quad (1)$$

ここで、 σ はエレクトレットの表面電荷密度、 t は試料の厚さ、 ϵ_1 および ϵ_2 は空隙および試料の誘電率、 E_2 はエレクトレットの内部電界である。電界 E_1 によって可動電極に作用する吸引力⁵⁾ F_{a1} は、

$$F_{a1} = -\epsilon_1 S E_1^2 / 2 = -\frac{\epsilon_0 S}{2} \left(\frac{\sigma t / \epsilon_2 + V_c}{d + \epsilon_1 t / \epsilon_2} \right)^2 \quad (2)$$

ただし、 $\epsilon_1 = \epsilon_0$ 、 ϵ_2 はエレクトレットフィルムの比誘電

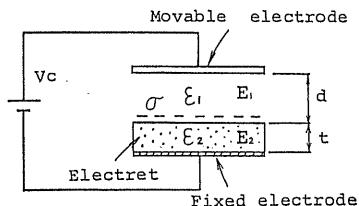
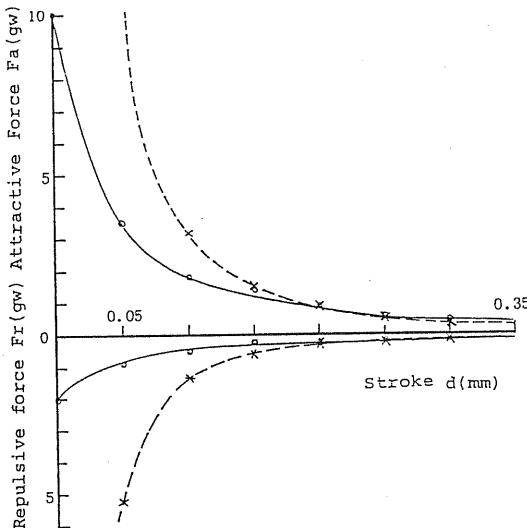


図 11 エレクトレットの電界および電気力のモデル

Fig. 11 Arrangement of charged dielectric with gaps, and electrodes in parallel plate geometry.



○: Experimental value, ×: Theoretical value, $\sigma: 2 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$, $V_c: 100 \text{ V}$.

図 12 吸引力、反発力をストロークと関係する。

Fig. 12 Stroke dependence of attractive force and repulsive force.

率 ($=\epsilon_s/\epsilon_0$)、 S は力の作用する対向面積である。ここで、駆動電圧 V_c を加えたことによる吸引力の増加分、すなわち、 V_c で制御できる吸引力を F_a とすれば、

$$F_a = -\frac{\epsilon_0 S V_c}{2(d+t/\epsilon_s)^2} \left(\frac{2\sigma t}{\epsilon_0 \epsilon_s} + V_c \right) \quad (3)$$

また、反発力 F_r は同様にして、駆動電圧を $-V_c$ とすればよいから、

$$F_r = -\frac{\epsilon_0 S V_c}{2(d+t/\epsilon_s)^2} \left(\frac{2\sigma t}{\epsilon_0 \epsilon_s} - V_c \right) \quad (4)$$

なお、 F_a と F_r の比率 k は、

$$k = |F_a/F_r| = (2\sigma t/\epsilon_0 \epsilon_s + V_c) / (2\sigma t/\epsilon_0 \epsilon_s - V_c) \quad (5)$$

(5)式より $k > 1$ となるから、 $F_a > F_r$ となる。この結果は図 10 と一致する。しかしながら k は V_c に対して極小値を示しているが(5)式からはこの関係は得られ

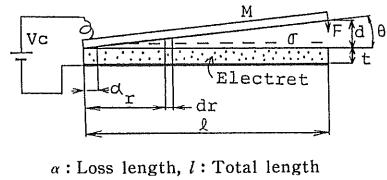


図 13 ヒンジ動作方式のモデル

Fig. 13 A model of a hinge type.

ない。これは、この極小値を示す理由の一つはエレクトレットの表面電荷密度 σ が V_c によって変化することが考えられる。

図 12 に F_a 、 F_r の理論値と実験値をプロットしたが、ストロークの小さい部分で両者間に大きな差が現われている。これは実験時に $\sigma = 2 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$ 、 $V_c = 100 \text{ V}$ および $S = 23 \text{ cm}^2$ でストロークをゼロにするのが困難なため初期間隔が 0.05 mm より大きかったためか、またはその他の因子が関係しているのかもしれない。このことを考慮して理論値を左側へ 0.05 mm 移行させると、かなり実験値に近づくことがわかる。

4.2 垂直動作方式とヒンジ動作方式の比較

前述のように垂直動作方式よりもヒンジ動作方式の方が大きな力が発生する。垂直動作方式での吸引力 (F_{ep}) は、

$$F_{ep} = -\frac{\epsilon_0 S V_c}{2(d+t/\epsilon_s)^2} \left(\frac{2\sigma t}{\epsilon_0 \epsilon_s} + V_c \right) \quad (6)$$

ヒンジ動作方式での吸引力 (F_{eh}) は図 13 から、

$$F_{eh} = -\frac{\epsilon_0 b V_c}{2l} \left(\frac{2\sigma t}{\epsilon_0 \epsilon_s} + V_c \right) \int_{\alpha}^l \frac{r}{(r\theta + t/\epsilon_s)^2} dr \quad (7)$$

ここで、エレクトレットの幅を b 、 $S = l \cdot b$ 、 $\theta = \alpha/l$ の条件で(7)式を解くと、

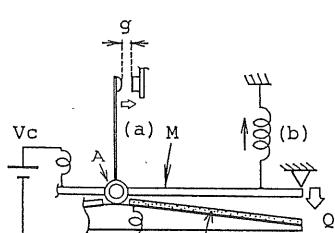
$$F_{eh} = -\frac{\epsilon_0 S V_c}{2d^2} \left(\frac{2\sigma t}{\epsilon_0 \epsilon_s} + V_c \right) \left\{ t \left(\frac{1}{\epsilon_s d + t} - \frac{l}{\epsilon_s \alpha d + lt} \right) + \log \left| \frac{d+t/\epsilon_s}{\alpha d/l + t/\epsilon_s} \right| \right\} \quad (8)$$

ここで、 $\alpha \ll l$ を考慮して、

$$|F_{eh}| - |F_{ep}| = (\epsilon_0 S V_c / 2d) (2\sigma t/\epsilon_0 \epsilon_s + V_c) \times \{(1/d) \log[1 + \epsilon_s d/t] - \epsilon_s (2\epsilon_s d + t) / (\epsilon_s d + t)^2\} \quad (9)$$

$d/t = \beta$ とおくと (ただし $\beta > 1$)、

$$|F_{eh}| - |F_{ep}| = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S V_c}{2\beta t^2} \left(\frac{2\sigma t}{\epsilon_0 \epsilon_s} + V_c \right) \frac{2\epsilon_s \beta + 1}{(\epsilon_s \beta + 1)^2} \times \left\{ \frac{(\epsilon_s \beta + 1)^2}{\epsilon_s \beta (2\epsilon_s \beta + 1)} \log[1 + \beta \epsilon_s] - 1 \right\} \quad (10)$$



(a) Moving spring, (b) Balance spring.
g : Contact gap.

図 14 エレクトレットスイッチの構造

Fig. 14 Structure of electret switch.

(10)式で括弧{}内を U とおけば、 U が正のとき $F_{ch} > F_{cp}$ となる。いま FEP-テフロンエレクトレットの場合、 $\epsilon_s = 2.2$ より

$$\begin{aligned} U &= \{(\epsilon_s \beta + 1)^2 / \epsilon_s \beta (2 \epsilon_s \beta + 1)\} \log |1 + \epsilon_s \beta| - 1 \\ &= \{(2.2 \beta + 1)^2 / 2.2 \beta (4.4 \beta + 1)\} \\ &\quad \times \log |1 + 2.2 \beta| - 1 \end{aligned} \quad (11)$$

$\beta > 1$ の条件の下で種々変化させたとき、 U の値は常に正の値をとるので $F_{ch} > F_{cp}$ が成り立っている。

4.3 エレクトレットによる力と機械的負荷の関係

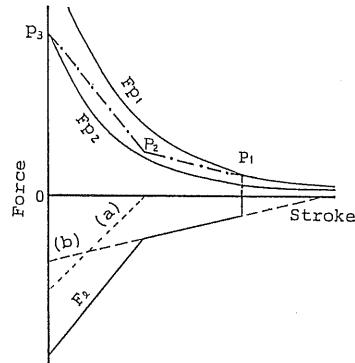
今回試作したエレクトレットスイッチの基本構造を図 14 に示した。また吸引力と機械的負荷の関係を図 15 に示した。駆動電圧 V_c が印加されていない状態では、可動電極は復帰バネ(b)の力によって Q と逆方向に力が作用して図 14 の状態を維持する。このときの力とストロークは P_1 点(図 15)で表わせる。

V_c をゼロから増加してゆくとエレクトレットによる力が復帰バネ(b)による力(P_1 点)より大きくなると、可動電極はエレクトレットに接触するまで Q 方向へ移動する。動作の途中において、接点間隙 g は可動電極の移動に伴って減少し接点接触に至る。このときの動作は P_2 点で表わせる。 P_2 点から接触片バネ(a)の力がエレクトレットの吸引力の負荷に加わる。したがって機械的負荷は P_2 点から(a), (b)を合成した負荷(F_1)となる。

V_c を減少させてゆくと、動作完了位置 P_3 において、 F_1 より吸引力のほうが小さくなると可動電極は Q と逆方向に移動して初期の位置(P_1 点)に復帰する。ここで動作するために必要な最小の駆動電圧が表 2 の動作電圧であり、そのときの吸引力特性が F_{p1} である。また、復帰するときの最大駆動電圧が復帰電圧であり、そのときの吸引力特性が F_{p2} である。

4.4 ポリマエレクトレットフィルムをスイッチに応用する場合の制約

1) エレクトレットスイッチの形状は電磁式の場合に比べて大きくなるが高さ 10 mm 以下の薄形にすること



F_{p1} : Characteristic of force at operating state, F_{p2} : Characteristic of force at return state, F_1 : Mechanical weight, —·—·—: $-F_1$.

図 15 エレクトレットの静電気力と機械的負荷の関係

Fig. 15 Relation between electro-static force and mechanical weight.

が可能である。

- 2) 電極式に比べ駆動電圧(V_c)が高いため高電圧駆動のスイッチに適している。
- 3) 力およびストロークが小さいため軽負荷(信号レベルとして電圧 24 V 以下、電流 0.3 A 以下の開閉)用に限定されよう。
- 4) 駆動電圧によるスイッチ開閉の応答性が比較的遅いのが欠点である。またエレクトレットの表面電荷の減衰によるスイッチの動作特性の変化も考慮しなければならないであろう。

5. おわりに

電磁式のスイッチに比べエレクトレットスイッチは格段の低消費電力化が可能で、しかもコイルをなくすことができるため電磁ノイズの発生がなく、軽量でコスト削減が可能となる。現状のエレクトレットフィルムを使ったスイッチはまだ使用上に制限があるが、用途を限定すると実用化できるであろう。

参考文献

- 1) R.L. Peek, Jr. and H.N. Wagar: *Switching Relay Design*, D. Van Nostrand Company Inc., New York (1955)
- 2) D. Perino, J. Lewiner and G. Dreyfus: *Electret Driven Electrical Relays*, L'onde Electrique, France (1977)
- 3) 佐藤隆一, 高松俊昭: 静電気学会講演論文集'83, p. 94, 静電気学会 (1983)
- 4) 赤真正人, 篠原功, 高松俊昭, 深田栄一: 高分子論文集, 38 (1981) 587
- 5) G.M. Sesser: *Electrets*, p. 17, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1980)