
生物の筋肉をモデルとした
集積形微小静電モータの開発

(62550185)

平成元年度科学研究費補助金（一般研究C）研究成果報告書



平成2年3月

研究代表者

壁井信之

東京女子医科大学
医用工学研究施設・講師

Development of Electrostatic Motor
as Biomimicking Skeletal Muscle

No. 62550185

Research Report
Supported by
Grant-in-aid of
The Ministry of Education,
Science & Culture

in 1989

March, 1990

Representative: Nobuyuki KABEI
(Institute of Biomedical Engineering,
Tokyo Women's Medical College)

はしがき

本研究では、生物の筋肉をモデルとした微小集積形静電アクチュエータの開発を目標とし、基礎として静電アクチュエータの基本素子を提案し、その性能について検討することを目的とした。

実用レベルの出力を得ることを主眼として、まず小形化に適した静電アクチュエータの基本構造を提案した。この静電アクチュエータは、誘電体を一對の対向する電極がはさみ込む構造をしており、電極間に電圧を印加すると誘電体が対向する電極間に引き込む力が働き、この力を利用してスライダを駆動するようになっている。

次にその推力発生理論式を導出した。さらに理論式に基づいて発生推力の増強法を検討した。この結果基本素子の発生推力を増強するには、

- (1) スライダの比誘電率を大きくする。
- (2) スライダと電極のギャップを小さくする。
- (3) 電極とスライダの幅を大きくする。
- (4) 印加電圧を大きくする。
- (5) スライダの厚さを最適値にする。
- (6) ギャップ充填材の比誘電率を最適値にする。

という条件を満足すればよいことが分かった。

また、基本素子を集積化するには電極の長さを短くし、電極間内外の電界密度の差を大きくすればよいことが分かった。

さらに静電アクチュエータの拡大基本素子を用いた実験によりスライダの挿入量に対する静電容量の変化量の比（推力係数）を測定したところ、推力係数は電極へのスライダの挿入量に関わらず一定であるという理論通りの結果が得られ、理論式の妥当性が確認された。

本研究ではこのように静電アクチュエータの開発を目標としたが、理論の面からまた基礎実験からも適切な形状に製作できれば、実用レベルの出力が得られることがわかった。

研究組織

研究代表者： 壁井信之 東京女子医科大学・医用工学研究施設・講師
研究分担者： 土屋喜一 早稲田大学・理工学部・教授

研究費

昭和62年度	1, 100千円
昭和63年度	600千円
平成元年度	400千円
計	2, 100千円

研究発表

発表予定 N.Kabei, T. Miyazaki, H. Kurata, et.al. Study on electrostatic linear motor as biomimicking skeletal muscle. at First world congress of biomechanics. (August 30 - September 4th 1990, La Jolla, Calif. U.S.A.)

研究成果

記号表 (その1)

記号	名称	単位
AR	アスペクト比 (縦-横比=L/D)	
C	静電容量	F
d	スライダの厚さ	m
d ₀	スライダの溝深さ	m
D	電極間距離	m
D _e	電極厚さ	m
E	電界	V/m
E ₁	ギャップ g ₁ の電界	V/m
E ₂	ギャップ g ₂ の電界	V/m
E _d	スライダ中の電界	V/m
F _a	実効推力	N (gf)
F _r	ステータ・スライダ間の動摩擦力	N (gf)
F _{r1}	ステータ上面とスライダ間の動摩擦力	N (gf)
F _{r2}	ステータ下面とスライダ間の動摩擦力	N (gf)
F _h	発生推力	N (gf)
F _{hoff}	コンデンサを電源から切り離れた時に スライダに加わる力	N (gf)
F _v	電極板間吸引力	N (gf)
F _{vr}	電極とスライダ間の吸引力	N (gf)
g	電極とスライダ間のギャップ	m
l	スライダの長さ	m
L	電極の長さ	m
L _p	電極間隔	m
L _s	電極支持体の長さ	m
N ₀	ステータの重量による垂直反力	N (gf)
N ₁	ステータの上面がスライダを押さえつける力 による垂直反力	N (gf)
P	電極ピッチ	m
Q	電荷量	C
R	電気抵抗	Ω
S	電極の面積	m ²
t	時間	s
t _n	誘電体のコーティング厚さ	m
U	静電エネルギー	J
V	電圧	V
V ₁	ギャップ g ₁ 間の電位差	V
V ₂	ギャップ g ₂ 間の電位差	V
V _d	スライダ (誘電体) 中の電位差	V

記号表 (その2)

記号	名称	単位
w	スライダ (誘電体) の幅	m
W	電極の幅	m
W _c	コンデンサに蓄えられたエネルギー	J
W _i	入力エネルギー	J
W _s	電極支持体の幅	m
X	スライダの挿入量	m
δ	スライダ (誘電体) のずれ	m
ϵ_0	真空の誘電率 ($= 8.85 \times 10^{-12}$)	F/m
ϵ_{r1}	スライダの誘電率の高い部分の比誘電率	
ϵ_{r2}	スライダの誘電率の低い部分の比誘電率	
ϵ_{rg}	ギャップ充填材の比誘電率	
ϵ_{rs}	スライダ (誘電体) の比誘電率	
η	エネルギー効率	
ρ	ギャップ充填材の体積抵抗率	$\Omega \cdot m$
$\partial C / \partial X$	推力係数	F/m

目 次

第1章 序論

1・1	研究目的	1
1・2	静電モータ	1
1・3	マイクロマシンング技術の静電モータへの応用	1

第2章 静電アクチュエータの駆動理論

2・1	緒言	4
2・2	静電アクチュエータの駆動原理	4
2・2・1	電荷一定駆動	4
2・2・2	電圧一定駆動	7
2・2・3	アクチュエータとしての駆動方法	9
2・3	推力の理論式	9
2・3・1	発生推力	9
2・3・2	極板間吸引力	11
2・3・3	誘電体のずれの発生推力への影響	11
2・3・4	コンデンサを電源から切り放した時に誘電体に加わる力	13
2・3・5	空気中以外での発生推力の理論式	13
2・4	理論式による発生力の計算	14
2・4・1	理論式による推力計算	14
2・4・2	理論式による極板間吸引力の計算	17
2・5	静電アクチュエータの基本素子の推力向上の要因	17
2・5・1	スライダの比誘電率	17
2・5・2	スライダ厚	21
2・5・3	ギャップ	21
2・5・4	ギャップ充填材の比誘電率	21
2・5・5	電極とスライダの幅	22
2・5・6	印加電圧	22
2・6	静電アクチュエータの集積化	22
2・6・1	電極の長さ	26
2・6・2	電極間内外のポテンシャル差	26
2・6・3	端効果の推力への影響	26
2・7	結言	29

第3章 静推力実験

3・1	緒言	30
3・2	実験の目的	30
3・2・1	概略	30
3・2・2	1電極タイプにおける静推力実験	30
3・2・3	2電極タイプにおける静推力実験	30

3・2・4	ギャップ充填材中における静推力実験	30
3・3	実験装置	30
3・3・1	静推力の測定	31
3・3・2	推力係数	31
3・3・3	実験装置の構成	31
3・3・4	ステータ（電極と電極支持体）	31
3・3・5	スライダ	33
3・3・6	測定装置	33
3・3・7	ステータの周辺装置	33
3・3・8	ギャップ充填材	35
3・4	実験方法	35
3・4・1	1電極タイプにおける静推力実験	35
3・4・2	2電極タイプにおける静推力実験	35
3・4・3	ギャップ充填材中における静推力実験	36
3・5	実験結果	36
3・5・1	1電極タイプにおける静推力実験	36
3・5・2	2電極タイプにおける静推力実験	36
3・5・3	ギャップ充填材中における静推力実験	36
3・6	考察	44
3・6・1	推力の理論式の妥当性	44
3・6・2	静電容量および推力係数の測定値と理論値との誤差	44
3・6・3	電極端部における端効果の影響	55
3・6・4	電極間隔の静推力への影響	57
3・6・5	ギャップ充填材の体積抵抗率の静推力への影響	57
3・6・6	電極のアスペクト比と端効果	57
3・7	結言	61

第4章 まとめ

4・1	本研究の成果	62
4・1・1	静電アクチュエータの駆動理論	62
4・1・2	静推力実験	62
4・2	今後の展望	63

第 1 章 序論

1・1 研究目的

生物が機能を実現する原理を明らかにし、この原理に基づいて人工のハードウェアで機能を実現する、いわゆるバイオメテックの手法が最近注目をあびるようになってきた。このような中で質量に対する出力が大きいばかりでなく、非常に精密にしかも高い効率で動くことが知られている生体の筋肉の研究が進められており^{1) ~4)}、最近では筋肉の機械エネルギーへの変換機構が静電気力によるものであるということが示唆されるようになってきた^{5) ~7)}。

筋肉の構造は図 1・1 のようになっている⁸⁾。

実際の筋肉では図に示すアクチンとミオシンの相互作用によって力を発生しているが、この作用機序を静電気力という物理的現象面から把握しモデル化すると図 1・2 に示すようになる。すなわちアクチンの代わりに誘電率の異なる材料を配し、ミオシンの代わりに電極とそれに接続された電源を配した形で表わされる。このモデルでは対向する電極との間にできる数多くの微小なコンデンサを、適当なタイミングで充放電させることによって電極と誘電体との間の吸引力を制御することで、直線運動を発生するアクチュエータとして機能する。

筋肉はわずか 10^{-4} [cm³] の容積で 2 [kg] の荷重に耐えることができ、数百 [g] の荷重ならば数 [$\mu\text{m/s}$] で動かすことができる。しかも筋肉は高分子でできているためその動きはサブミクロンで制御することができる。

こういう特徴は現存するどんな種類のアクチュエータより優れており、この筋収縮の原理を応用すれば性能の優れたアクチュエータを開発する事が可能となろう。

本研究ではこの筋収縮の原理を応用し、無機物質からなるバイオモータとしての集積形微小静電モータを開発し、究極の人工筋肉を実現することを目的とした。

1・2 静電モータ

静電気を利用したいわゆる静電モータは歴史が古い。電磁モータが考案される 100 年も前に実現していたのを見ても、モータとしては電磁形より先輩格である。18 世紀以降には科学の面で、あるいは実用的な利用面で広く研究され様々なものが考案された。静電モータの基本駆動原理は、電荷間に作用する静電気力によって生ずる機械的運動を利用して駆動しているが、その動作方法や特有の性質によっていくつかに分類できる。可動部分への電荷の与え方によって静電モータを分類したものが表 1・1 である⁹⁾。

しかしこれらの静電モータは出力が小さくいまだ実用に耐えるまでには至っていない。その大きな理由は電磁モータと同じスケールで製作しようとしたからである。通常、電磁力は静電力より 3~4 桁程度大きいので静電モータより電磁モータの方がはるかに出力が大きい。しかしこれはマクロ領域での話でマイクロ領域には必ずしも当てはまらない。電磁力は体積に比例して増す力(体積力)であるが、静電力は面積に比例して増す力である。物体が小さくなればなる程その比面積が増すので、電磁力と静電力を比較したとき $\mu\text{m} \sim \text{nm}$ の大きさのマイクロな領域で静電力は電磁力より有効になる。したがってマイクロアクチュエータにすれば静電力を用いた方が有利になる。

1・3 マイクロマシンング技術の静電モータへの応用

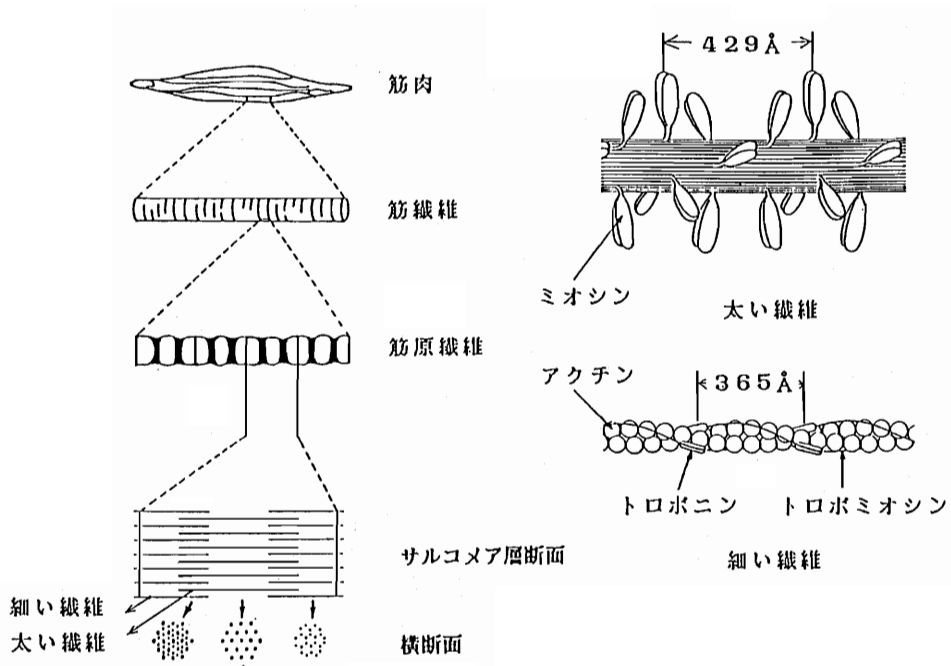


図1・1 筋肉の構造

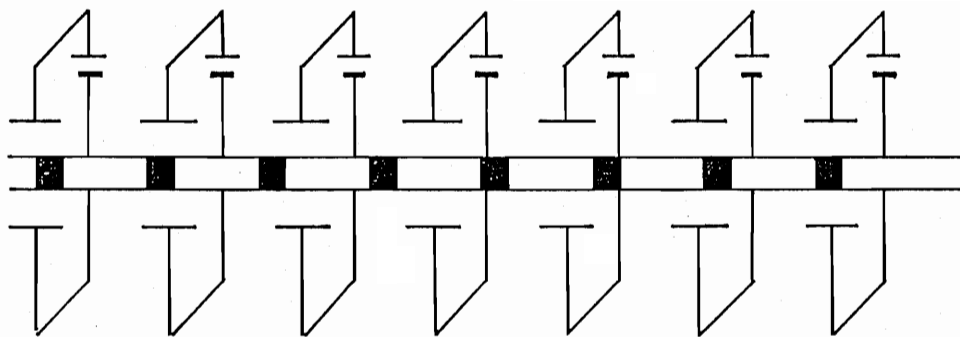


図1・2 筋肉の物理モデル

従来、微小機械を作ることは技術的に困難であったため、静電アクチュエータは現実味の乏しいものであった。

これに対し最近半導体集積回路の作成に用いられる加工技術を生かして、立体的で微細な部品を作るマイクロマシニングという技術が登場してきた⁹⁾。基本的な加工技術にはフォトリソグラフィによるエッチング技術が基盤となり、これに、必要な材料を堆積する膜形成技術、材料を張り合わせる接合技術等が組み合わさったものである。

マイクロマシニングの特徴としては

- ① 小形・軽量でかつ精巧な部品ができる。
- ② 加工コストが小さいことで集積回路の場合のように基本的に量産に適しておりフォトリソグラフィとエッチングを中心としたバッチプロセスが適用できる利点がある。
- ③ 一般に機械強度が大で、材料の疲労などの影響も少ない。
- ④ 集積化、一体化した構造ができる。

等が挙げられる。

この手法をマイクロアクチュエータの製作と、その集積化に応用できれば、静電力駆動のマイクロアクチュエータの開発は、より現実的なものになるであろう。

表1・1 静電モータの分類

可動部への電荷の与え方	モータの呼称	運動形態	電荷間の力	電荷を運ぶ担体
接触帯電形	電気ベル Baileyのモータ 電気レーシングボール キャパシタンスモータ	往復運動 回転運動 回転運動 回転運動	反発または吸引 反発または吸引 反発または吸引 反発および吸引	導体
スパーク放電形	Franklinのスパークモータ Mooreのスパークモータ	回転運動 回転運動	反発 反発	導体
コロナ放電形	Poggendorffのコロナモータ 電気つむじ風 McVayのコロナモータ Karpovのコロナモータ	回転運動 回転運動 回転運動 回転運動	反発または吸引 反発または吸引 反発または吸引 反発または吸引	絶縁体
誘導電荷形	誘導電荷モータ	回転運動	反発および吸引	誘電体
エレクトレット形	エレクトレットモータ 直線状スロット効果モータ	回転運動 直線運動	反発または吸引 反発および吸引	エレクトレット

第2章 静電アクチュエータの 馬区重力理論

2・1 緒言

この章ではまず静電アクチュエータの駆動理論を簡単なモデルを用いて解説し、より現実的なアクチュエータの単体モデルについての発生推力の理論式に発展させる。次にこの理論式を用いて推力の数値計算を行い、その結果を検討したうえで、有効な静電アクチュエータの基本素子の推力増強法と基本素子の集積化の方法を提案する。そして最後にアクチュエータとしての動作原理について述べる。

2・2 静電アクチュエータの駆動原理

静電アクチュエータの基本構造は図2・1に示すように一対の電極が形成するコンデンサを適切な時点で充電あるいは放電することによって、電気エネルギーを機械エネルギーに変換する構造をしている。図2・1において電極に電圧を印加すると電極板間で引き合う力と誘電体を電極間に引き込む力が発生する。このうち、引き込む力を駆動力として取り出すのである。

このエネルギー変換方法には(1)電荷を一定に保つ方法と(2)電圧を一定に保つ方法が考えられる。そこでこの変換方法を以下で考えてみる。なお、図2・1において ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ_{r_s} は誘電体(スライダ)の比誘電率、 ϵ_{r_g} は電極間を満たしているスライダ以外の物質(ギャップ充填材)の比誘電率であり、その関係は $\epsilon_{r_s} > \epsilon_{r_g}$ である。

なお、議論を進めるため静電アクチュエータの基本素子の各部名称を図2・2に示すごとく定義した。また電極の幅 W とスライダの幅 w は等しいものとした上で理論式をたてた。

2・2・1 電荷一定駆動

図2・3(a)～(d)はアクチュエータの動作原理を説明するものであるが、図中、図2・1と同一部分には同一の符号を付し、その説明は省略する。

[動作1] 図2・3(a)においては電極間に電圧 V_0 を印加し、充電を行なった状態で、かつギャップ充填材の比誘電率 ϵ_{r_g} より高い比誘電率 ϵ_{r_s} を有する誘電体が電極の右端にある場合($X=0$)である。このとき電荷量 $Q(0)$ 、静電エネルギー $U(0)$ は次のようになる。

$$Q(0) = C(0) \cdot V(0) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r_g} WL}{d} \cdot V_0 \quad (2 \cdot 1)$$

$$U(0) = \frac{1}{2} C(0) \cdot V(0)^2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r_g} WL}{2d} \cdot V_0^2 \quad (2 \cdot 2)$$

この状態では電界は図2・5(a)に示すように誘電体を包むように広がり、誘電体は電極間に引き込まれ始める。

[動作2] このとき、図2・3(b)に示すように電極間に印加していた電圧を解放する。図2・3(b)では誘電体が電極間に距離 X だけ引き込まれており、矢印で示す方向への力が発生している。このとき電荷量 $Q(X)$ は[動作1]で与えられた量だけ保持されているため次のように一定である。

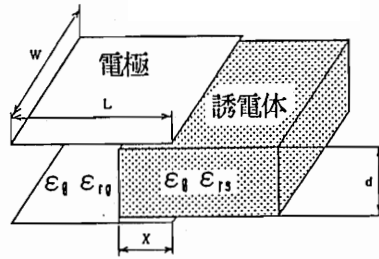
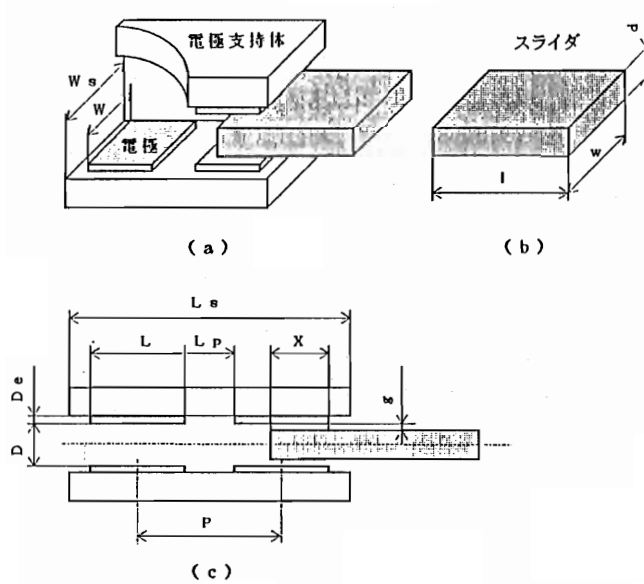
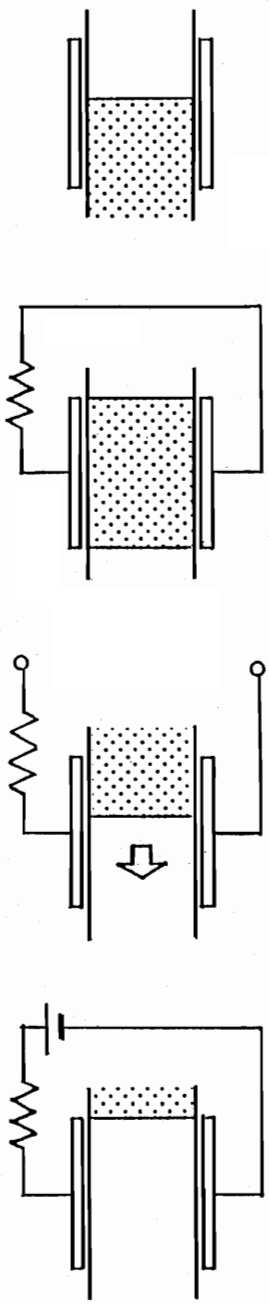


図2・1 静電アクチュエータ基本構造



- | | |
|------------------|-----------------------------|
| d ; スライダの厚さ | Thickness of Slider |
| D_e ; 電極の厚さ | Thickness of Electrode |
| D ; 電極間距離 | Distance of Electrodes |
| g ; ギャップ | Gap |
| l ; スライダの長さ | Length of Slider |
| L ; 電極の長さ | Length of Electrode |
| L_p ; 電極間隔 | Interval of Electrode |
| L_s ; 電極支持体の長さ | Length of Electrode Support |
| P ; 電極ピッチ | Electrode Pitch |
| S ; 電極の面積 | Area of Electrode |
| w ; スライダの幅 | Width of Slider |
| W ; 電極の幅 | Width of Electrode |
| W_s ; 電極支持体の幅 | Width of Electrode Support |
| X ; スライダ挿入長 | Length of Insertion |

図2・2 静電アクチュエータ基本素子の各部の名称



(a) 動作1 (b) 動作2 (c) 動作3 (d) 動作4

図2・3 静電アクチュエータの基本動作原理

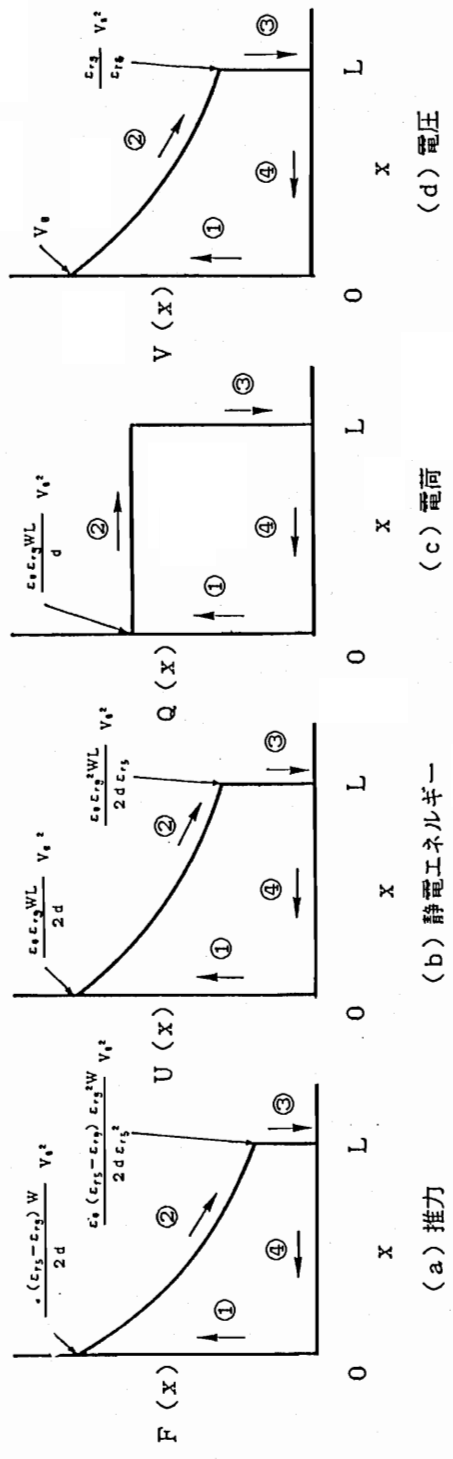


図2・4 基本動作のサイクル線図 (電荷一定の場合)

$$Q(X) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{rg} WL}{d} \cdot V_0 \quad (2.3)$$

一方静電エネルギー $U(X)$ は誘電体が引き込まれるに従い減少し、次のような X の関数で表わされる。

$$\begin{aligned} U(X) &= \frac{1}{2} \frac{Q(X)^2}{C(X)} \\ &= \frac{1}{2d} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_{rg}^2 WL^2 V_0^2}{\epsilon_{rg} L + (\epsilon_{rs} - \epsilon_{rg}) X} \end{aligned} \quad (2.4)$$

これに対応して発生する力 $F(X)$ は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} F(X) &= -\frac{\partial U(X)}{\partial X} \\ &= \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{rs} - \epsilon_{rg})}{\{\epsilon_{rg} L + (\epsilon_{rs} - \epsilon_{rg}) X\}^2} \cdot \frac{\epsilon_{rg}^2 WL^2 V_0^2}{2d} \end{aligned} \quad (2.5)$$

電圧 $V(X)$ はそれにともなって次のように表わされる。

$$V(X) = \frac{Q(X)}{C(X)} = \frac{\epsilon_{rg} V_0}{\epsilon_{rg} + X/L \cdot (\epsilon_{rs} - \epsilon_{rg})} \quad (2.6)$$

[動作3] やがて、図2・3(c)に示すように誘電体が電極の間に完全にいったときを見はからって電極間を短絡する。すると電極間にたまっていた電荷は無くなり

$$Q=0 \quad U=0 \quad F=0 \quad V=0$$

となる。

[動作4] このとき、アクチュエータを介して結合した他のコンデンサを図2・3(a)に示す位置関係で充電させれば、図2・3(d)に示すように誘電体はコンデンサから引き抜かれる。

上述したアクチュエータの動作のサイクルを線図で表わすと図2・4(a)～(d)に示す如きである。また、電界の分布の様子を有限要素法(FEM: Finite Element Method)を用いてシミュレーションしたものを、図2・5(a)～(c)に示す。

2・2・2 電圧一定駆動

電圧一定駆動は2・2・1の動作2において電極間に電圧をかけたままにしておく駆動方法である。

図2・6(a)～(d)はアクチュエータの動作原理を説明するものであるが、図中、図2・2と同一部分には同一の符号を付し、その説明は省略する。

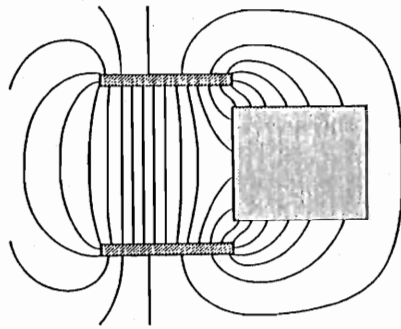
[動作1] 電荷一定駆動の状態と同じ。

[動作2] 図2・6に示す状態で電極間に電圧をかけたままにしておく、電極間に加わる電圧が V_0 一定であるため電荷 $Q(X)$ は

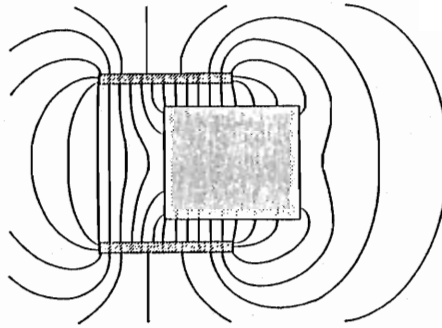
$$\begin{aligned} Q(X) &= C(X) \cdot V(X) \\ &= \epsilon_0 \left\{ \frac{\epsilon_{rg} WL}{d} + \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{rg}) WX}{d} \right\} V_0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

となる。

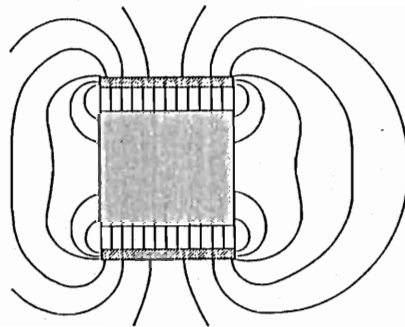
静電エネルギー $U(X)$ は



(a) 動作 1



(b) 動作 2



(c) 動作 3

図 2・5 基本素子の動作と電界分布 (電荷一定の場合)

$$\begin{aligned}
 U(X) &= \frac{1}{2} C(X) \cdot V(X)^2 \\
 &= \frac{1}{2} \epsilon_0 \left\{ \frac{\epsilon_{r0} WL}{d} + \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{r0}) WX}{d} \right\} V_0^2 \quad (2 \cdot 8)
 \end{aligned}$$

また発生する推力 $F(X)$ は次のように表わされる。

$$F(X) = \frac{\partial U(X)}{\partial X} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{r0}) W}{d} \cdot V_0^2 \quad (2 \cdot 9)$$

[動作3] 電荷一定駆動の状態と同じ。

[動作4] 電荷一定駆動の状態と同じ。

したがって動作サイクルは図2・7(a)～(d)に示すようになる。

2・2・3 アクチュエータとしての駆動方法

静電アクチュエータには電荷一定駆動と電圧一定駆動の二種類の駆動方法があることがわかった。この二種類の駆動法のうちどちらを採用するか、消費エネルギーと推力の二点に着目して検討した。

1) 消費エネルギー

静電エネルギーに着目する。図2・4(b)と図2・7(b)とを比較すると電荷一定駆動と電圧一定駆動の静電エネルギーの比は $\epsilon_{rs} : \epsilon_{r0}$ である。したがって消費エネルギーは電圧一定駆動の方が $\epsilon_{rs} / \epsilon_{r0}$ だけ大きい。

2) 推力

推力は電荷一定駆動では誘電体が電極間に引き込まれるにしたがって小さくなり、電圧一定駆動では推力は一定であることがすでにわかっている。仕事量で両者を比較すると、電圧一定駆動の方が電荷一定駆動より $\epsilon_{rs} / \epsilon_{r0}$ だけ大きい。

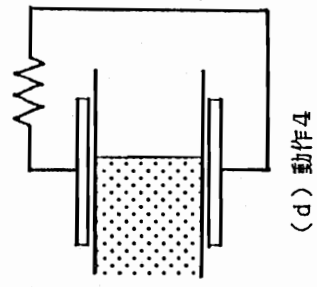
以上より、消費エネルギーに着目すると電圧一定の方が大きい、その分推力も大きく、しかも一定量の推力が取り出せる。そこでより大きくしかも一定の推力を取り出すために、静電アクチュエータの基本素子には電圧一定駆動を採用することにした。

2・3 推力の理論式

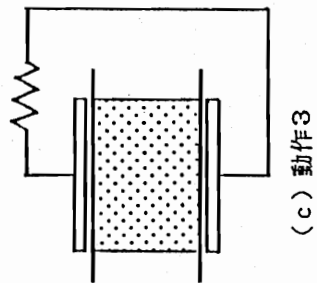
2・2では電極とスライダ間のギャップがないものとして推力を求めた。しかし実際にはギャップ0ということは有り得ない。そこでここでは図2・8に示されるような電極とスライダ間にギャップが存在する場合について、電圧一定駆動の際の発生力を、さらに具体的に考えた。またコンデンサの向かい合う電極に直流電圧を印加した際、誘電体をコンデンサ内に引き込む力の他に極板どうしが引き合う力が発生する。この2つの発生力を計算で求めてみる。なお、電極と誘電体間のギャップは空気(比誘電率 $\epsilon_{r0} = 1$)で満たされているものとし、コンデンサの端効果はないものとする。

2・3・1 発生推力

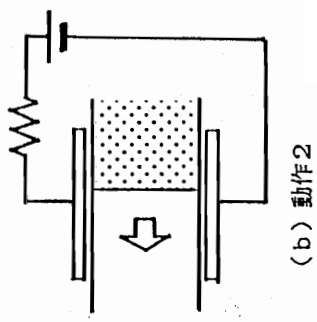
図2・8に示すコンデンサの静電容量 $C(X)$ は、真空の誘電率を ϵ_0 、誘電体(スラ



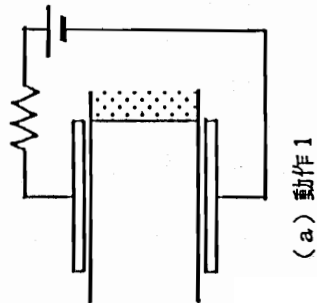
(d) 動作4



(c) 動作3



(b) 動作2



(a) 動作1

図2・6 静電アクチュエータの基本動作原理 (電圧一定の場合)

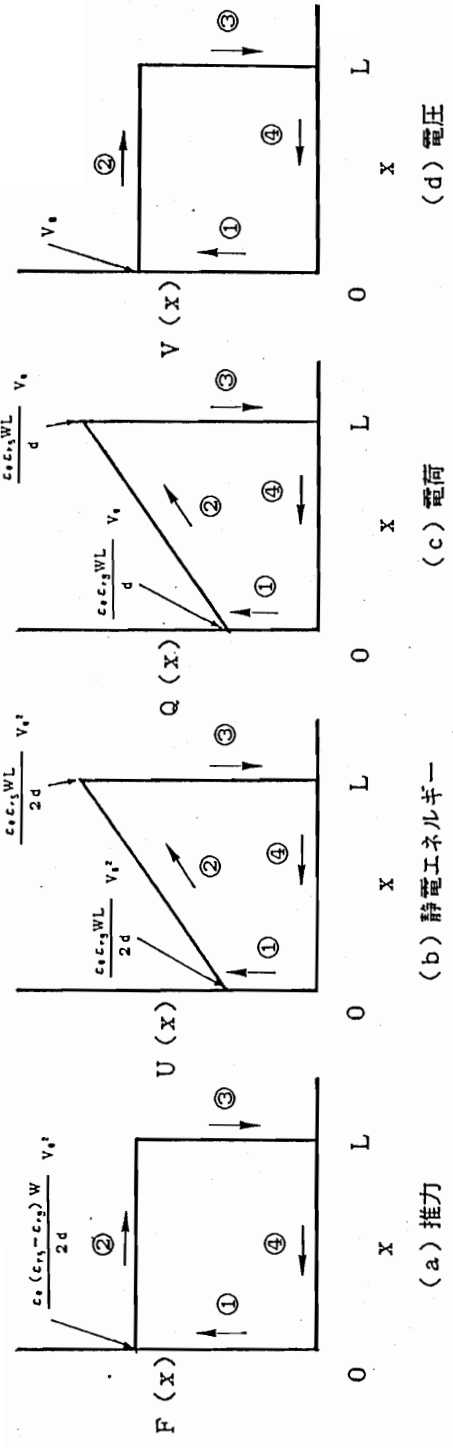


図2・7 基本動作のサイクル線図 (電圧一定の場合)

イタ) の比誘電率を ϵ_{rs} , 電極と誘電体間のギャップを g , 誘電体の厚さを d とすると,

$$C(X) = \frac{\epsilon_0 W(L-X)}{2g+d} + \frac{1}{\frac{2g}{\epsilon_0 W X} + \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_{rs} W X}} \quad (2 \cdot 10)$$

$$= \frac{\epsilon_0 W L}{2g+d} + \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{rs} - 1) W d}{(2g+d)(2g\epsilon_{rs} + d)} \cdot X \quad (2 \cdot 11)$$

となり, このコンデンサに蓄えられる静電エネルギー $U(X)$ は,

$$U(X) = \frac{1}{2} C(X) V^2 \quad (2 \cdot 12)$$

で与えられる.

誘電体の挿入量 X に対する静電エネルギーの変化 $\partial U(X) / \partial X$ は

$$\frac{\partial U(X)}{\partial X} = \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{rs} - 1) W d}{2(2g+d)(2g\epsilon_{rs} + d)} \cdot V^2 \quad (2 \cdot 13)$$

となる. ここで $\partial U / \partial X > 0$ であるから, X が増加する方向, すなわち誘電体が極板間の内部に引き込まれる方向に力が働く. この力が推力になる. したがって推力 F_h は次式で表わされる.

$$F_h = \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{rs} - 1) W d}{2(2g+d)(2g\epsilon_{rs} + d)} \cdot V^2 \quad (2 \cdot 14)$$

2.3.2 極板間吸引力

極板間に加わる吸引力 F_v は, 極板間距離を $y (= 2g+d)$ として $C(X)$ を表わし, 静電エネルギーを y で偏微分すると

$$F_v = - \frac{\epsilon_0 W L}{2(2g+d)^2} \cdot V^2 - \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{rs} - 1) \{ 4g\epsilon_{rs} + (\epsilon_{rs} + 1) d \}}{2(2g+d)^2 (2g\epsilon_{rs} + d)^2} W d V^2 \cdot X \quad (2 \cdot 15)$$

で表される. 特に $X=L$ の時は

$$F_v = - \frac{\epsilon_0 \epsilon_{rs}^2 W L}{2(2g\epsilon_{rs} + d)^2} \cdot V^2 \quad (2 \cdot 16)$$

2.3.3 誘電体のずれの発生力への影響

1) 誘電体に働く吸引力

極板間距離が一定の場合, 誘電体が極板間中心より δ だけずれたときに誘電体に働く吸引力を求める.

図 2.9 のように誘電体が δ だけずれた時のギャップ g_1 は $g - \delta$, ギャップ g_2 は $g + \delta$ になる.

ギャップ g_1 の電位差を V_1 , 電界を E_1 , ギャップ g_2 の電位差を V_2 , 電界を E_2 , そして誘電体中の電位差を V_d , 電界を E_d とすると, 極板間の電位差 V は

$$V = V_1 + V_2 + V_d \quad (2 \cdot 17)$$

となる. また, 電束の連続性より

$$D = \epsilon_0 E_1 = \epsilon_0 E_2 = \epsilon_0 \epsilon_{rs} E_d \quad (2 \cdot 18)$$

となるので, $V_1 = (g - \delta) E_1$, $V_2 = (g + \delta) E_2$, $V_d = d \cdot E_d$ なる関係と式 (2.17) (2.18) を用いて各電界は,

また極板間吸引力 F_v は以下ようになる。

$$F_v = - \frac{\epsilon_0 \epsilon_{rg} WL}{2 (2g+d)^2} \cdot V^2 - \frac{\epsilon_0 \epsilon_{rg} (\epsilon_{rs} - \epsilon_{rg}) \{ 4g \epsilon_{rs} + (\epsilon_{rs} + \epsilon_{rg}) d \}}{2 (2g+d)^2 (2g \epsilon_{rs} + \epsilon_{rg} d)^2} Wd V^2 \cdot X \quad (2 \cdot 27)$$

2・4 理論式による発生力の計算

2・3で静電アクチュエータの基本素子の発生力計算の理論式を求めた。これはコンデンサの端効果がない理想的な場合についての理論式であるが、ここでは端効果は無視し、式(2・26)を用いて実際に寸法値を与えて、推力計算および極板間吸引力の計算を行った。

2・4・1 理論式による推力計算

推力に影響を与えるパラメータは、 ϵ_{rs} 、 d 、 g 、 ϵ_{rg} 、 W 、 V である。これらの値および L を表2・1に示すように設定すると推力は $F_h = 21.6 [\mu N]$ 一定となる。

表2・1 基本素子の寸法設定値

ϵ_{rs}	10000
d	1 mm
g	10 μm
ϵ_{rg}	1
W	10 mm
V	100 V
L	10 mm

各パラメータを表2・1の値に固定したまま、一部のパラメータの値を変化させたときの推力増減の様子を、理論式(2・26)を用いて計算によって求めた。

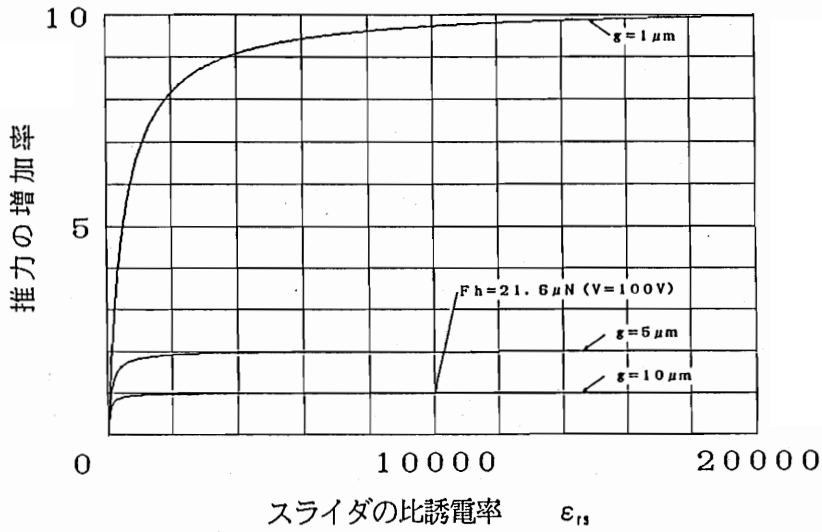
(1) スライダの比誘電率を変化させたときの推力

ギャップをパラメータにとり、 $F_h = 21.6 [\mu N]$ を単位推力として1とおいたとき、スライダの比誘電率と推力の増加率(推力の増加率=発生推力 $[\mu N]$ /21.6 $[\mu N]$)との関係を図示したものが図2・10(a)である。

また、同じくギャップをパラメータにとり、それぞれのギャップにおいてスライダの比誘電率 $\epsilon_{rs} = 10000$ の際の発生推力を1とおいたとき、スライダの比誘電率と推力の増加率(推力の増加率=発生推力/ $\epsilon_{rs} = 10000$ における発生推力)との関係を図示したものが図2・10(b)である。

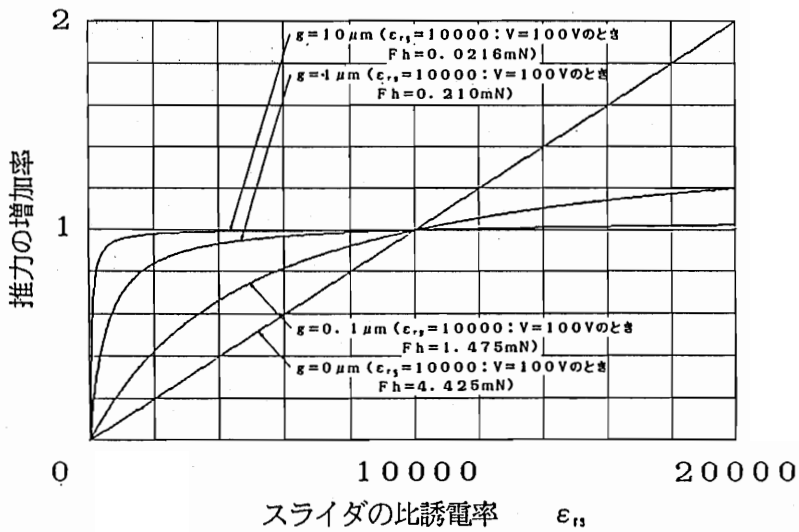
(2) スライダの厚さを変化させたときの推力

ギャップをパラメータにとり、 $F_h = 21.6 [\mu N]$ を推力1とおいたとき、スライダの厚さと推力の増加率(推力の増加率=発生推力 $[\mu N]$ /21.6 $[\mu N]$)との関係を図示したものが図2・11(a)である。



(a) $W=10\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ $\epsilon_r=1$ $d=1\text{mm}$

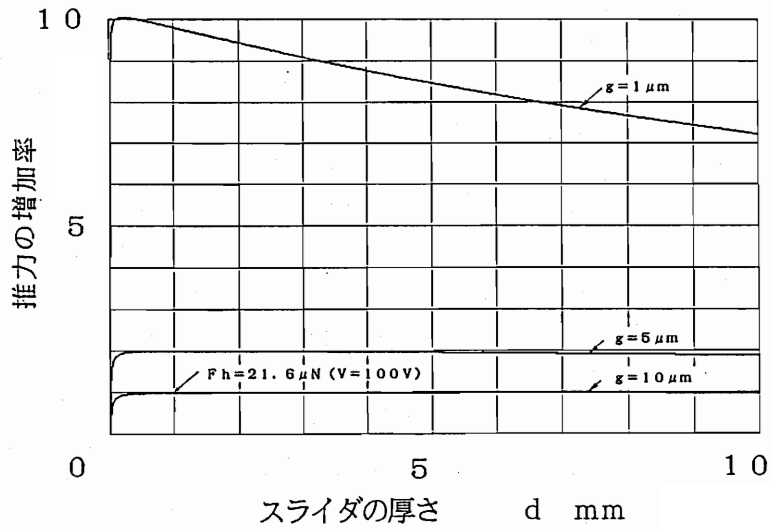
(a) 21.6 [μN] を単位推力とした場合の比率



(b) $W=10\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ $\epsilon_r=1$ $d=1\text{mm}$

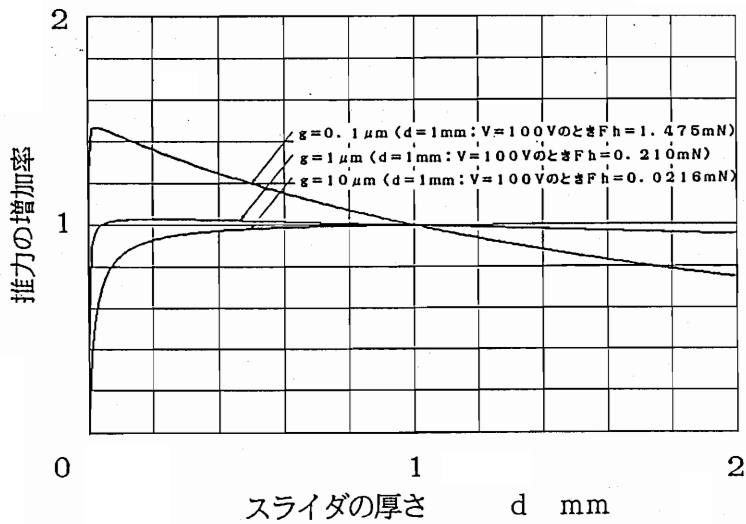
(b) スライダの比誘電率 $\epsilon_{r,s}$ を 10000 とした場合との比率

図 2・10 スライダの比誘電率 $\epsilon_{r,s}$ の推力の増加率への影響



(a) $W=10\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ $\epsilon_{r1}=10000$ $\epsilon_{r2}=1$

(a) 21.6 [μN] を単位推力とした場合の比率



(b) $W=10\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ $\epsilon_{r1}=10000$ $\epsilon_{r2}=1$

(b) スライダの厚さ d を 1 [mm] とした場合との比率

図2・11 スライダの厚さ d の推力の増加率への影響

また、同じくギャップをパラメータにとり、それぞれのギャップにおいてスライダの厚さ $d = 1$ [mm] の際の発生推力を 1 とおいたとき、スライダの厚さと推力の増加率 (推力の増加率 = 発生推力 / $d = 1$ [mm] における発生推力) との関係を図示したものが図 2・11 (b) である。

(3) ギャップの大きさ

$F_h = 21.6$ [μN] を推力 1 とおいたとき、ギャップの大きさと推力の増加率 (推力の増加率 = 発生推力 [μN] / 21.6 [μN]) との関係を図 2・12 (a) に示す。

また、図 2・12 (a) の $g = 0 \sim 10$ [μm] の範囲において、縦軸を対数目盛りでとったものが図 2・12 (b) である。

(4) ギャップ充填材の比誘電率

ギャップをパラメータにとり、ギャップ充填材の比誘電率と推力との関係を図示したものが図 2・13 (a) である。

また、同じくギャップをパラメータにとり、それぞれのギャップにおいてギャップ充填材の比誘電率 $\epsilon_{r_g} = 1$ の際の発生推力を 1 とおいたとき、ギャップ充填材の比誘電率と推力の増加率 (推力の増加率 = 発生推力 / $\epsilon_{r_g} = 1$ における発生推力) との関係を図示したものが図 2・13 (b) である。

2・4・2 理論式による極板間吸引力の計算

極板間吸引力に影響を与えるパラメータは、 ϵ_{r_s} 、 d 、 g 、 ϵ_{r_g} 、 W 、 V 、および L である。各パラメータを表 2・1 の値に固定したまま、スライダを徐々に挿入したときの極板間吸引力の様子を図 2・14 (a) に示す。スライダを完全に挿入した時点での極板間吸引力は $F_v = 11.0$ [mN] である。これは同時に発生している推力の約 500 倍の大きさの力である。

また、スライダを完全にステータに挿入した際の、ギャップと電極板間吸引力との関係を吸引力を対数軸にとって図示したものが図 2・14 (b) である。

2・5 静電アクチュエータの基本素子の推力向上の要因

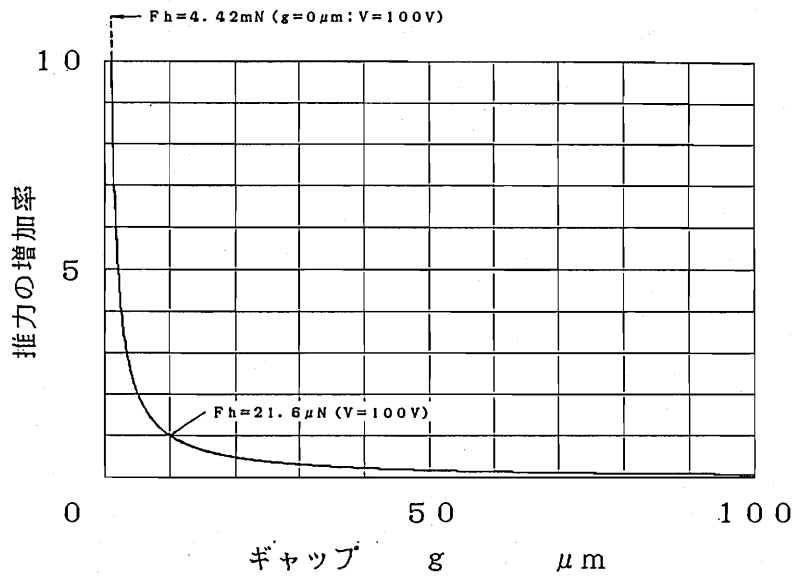
以上の計算結果から、静電アクチュエータの基本素子の推力を向上させるには次の 6 項目が考えられることが分かった。

- ① スライダの比誘電率 ϵ_{r_s} 大きくする。
- ② スライダ厚 d 最適値にする。
- ③ ギャップ g 小さくする。
- ④ ギャップ充填材の比誘電率 ϵ_{r_g} 最適値にする。
- ⑤ スライダの幅 w 大きくする。
- ⑥ 印加電圧 V 大きくする。

これらの項目について以下に詳しく検討する。

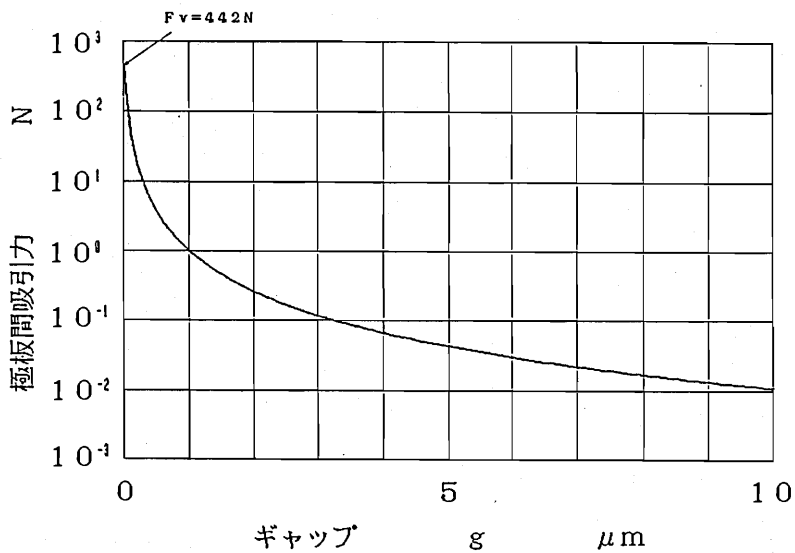
2・5・1 スライダの比誘電率

スライダの比誘電率 ϵ_{r_s} は、図 2・10 よりギャップが小さくなればなるほど、できるだけ大きい方が推力向上に有利であることがわかる。しかしスライダにはこの他に



(a) $W=10\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ $\epsilon_{r1}=10000$ $\epsilon_{r2}=1$ $d=1\text{mm}$

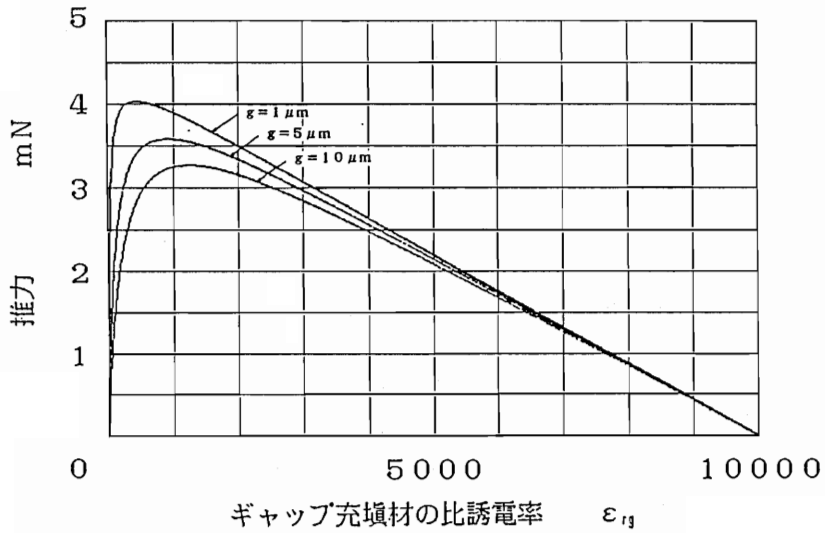
(a) $21.6 [\mu\text{N}]$ を単位推力とした場合の比率



(b) $W=10\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ $\epsilon_{r1}=10000$ $\epsilon_{r2}=1$ $d=1\text{mm}$ $V=100\text{V}$ $X=10\text{mm}$

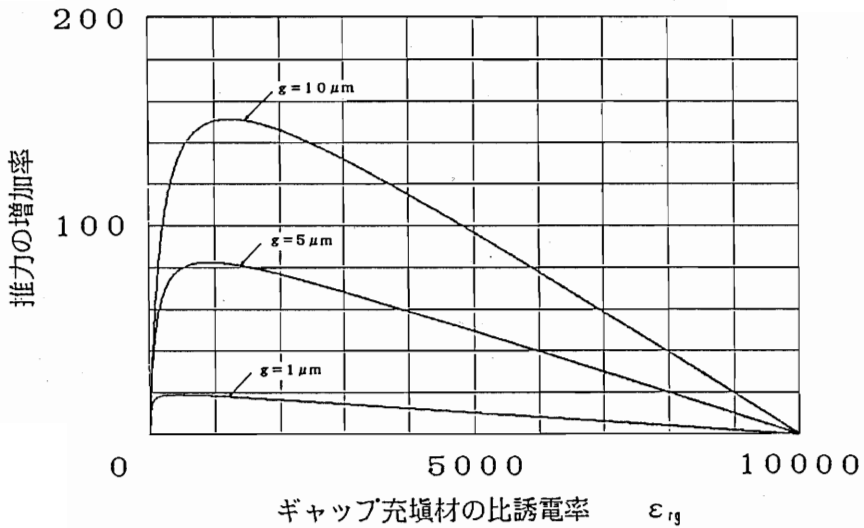
(b) $21.6 [\mu\text{N}]$ を単位推力とした場合の比率を対数目盛で示す。

図2・12 ギャップの大きさ g の推力の増加率への影響



(a) $W=10\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ $\epsilon_r=10000$ $d=1\text{mm}$ $V=100\text{V}$
 ギャップ充填材の比誘電率と推力

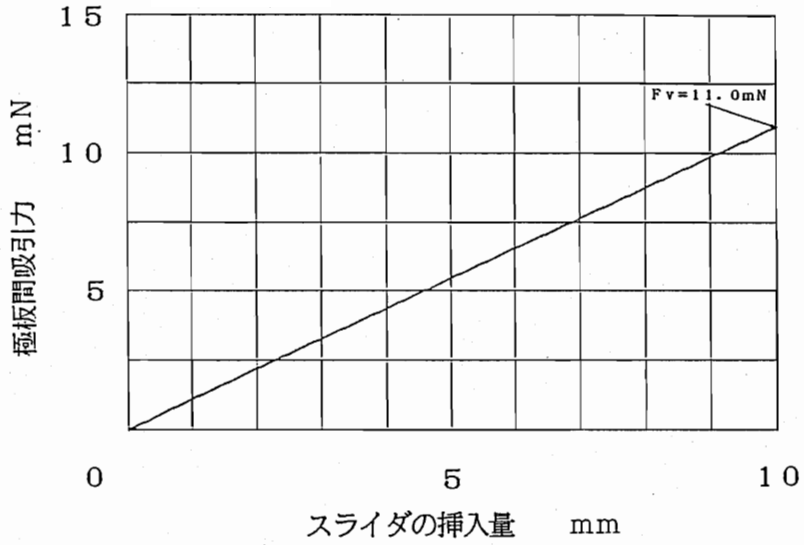
(a) 21.6 [μN] を単位推力とした場合の比率



(b) $W=10\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ $\epsilon_r=10000$ $d=1\text{mm}$

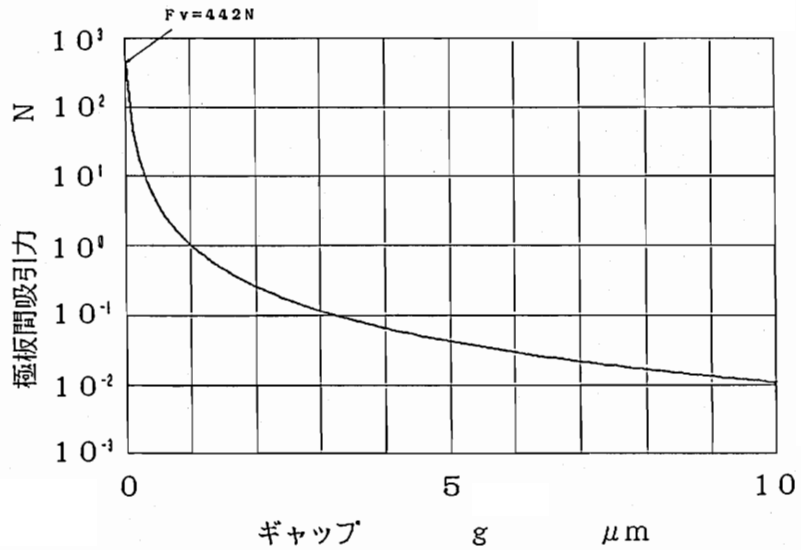
(b) ギャップ充填材の比誘電率 ϵ_{rg} を1とした場合との比率

図2・13 ギャップ充填材の比誘電率 ϵ_{rg} の推力の増加率への影響



(a) $W=10\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ $g=10\mu\text{m}$ $\epsilon_r=10000$ $\epsilon_s=1$ $d=1\text{mm}$ $V=100\text{V}$

(a) スライダ挿入量の吸引力への影響



(b) $W=10\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ $\epsilon_r=10000$ $\epsilon_s=1$ $d=1\text{mm}$ $V=100\text{V}$ $X=10\text{mm}$

(b) スライダを電極間に完全に挿入した場合における、ギャップの吸引力への影響

図2・14 極板間吸引力

- ① 機械的性質が良い
- ② 電氣的性質が良い
- ③ 加工性が良い
- ④ 耐食性が良い

等の性質も兼ね備えていなければならない。

①の機械的性質が良いというのは、剛性を備えていながらも十分な靱性も兼ね備えていることである。②の電氣的性質が良いというのは、体積抵抗および絶縁耐力が高く、温度による電氣的性質の変化が少ないことである。③の加工性が良いというのは、切削性、研削性に優れ微細加工がしやすいということである。④の耐食性が良いというのは、ギャップ充填材に侵されることがないということである。これらの性質を兼ね備えていれば、スライダの比誘電率はギャップに見合った値を選ぶのがよい。ギャップ $g = 10 [\mu\text{m}]$, スライダ厚 $d = 1 [\text{mm}]$ の場合は比誘電率 1000 以上が望ましいがむやみに大きくしてもその効果は小さい。

2・5・2 スライダ厚

図 2・1 1 からわかるようにスライダ厚 d を変化させると推力は極値を持ち、推力が最大になるスライダ厚 d は

$$d = 2g \frac{\epsilon_{rs}^{1/2}}{\epsilon_{rg}^{1/2}} \quad (2 \cdot 28)$$

で表わされる。したがってスライダ厚は、スライダの材料が決まれば、強度を考慮しつつできるだけ式 (2・28) で示される d の最適値に近付けるようにすればよい。

2・5・3 ギャップ

ギャップの大小は電極とスライダの加工精度に大きく左右されるが、できるだけ小さい方がよい。特に図 2・1 2 からわかるようにギャップが $10 [\mu\text{m}]$ 以下を保てればかなり大きな推力が得られる。

2・5・4 ギャップ充填材の比誘電率

1) スライダの誘電率の高い部分の推力への影響

図 2・1 3 からわかるようにギャップ充填材の比誘電率を変化させると推力は極値を持ち、推力が最大になるギャップ充填材の比誘電率 ϵ_{rg} は

$$\epsilon_{rg} = \frac{\epsilon_{rs} \{2g - (4g^2 + 2gd)^{1/2}\}}{d} \quad (2 \cdot 29)$$

で表わされる。しかしギャップ充填材を用いる場合は、この他に

- ① 体積抵抗が大きい
- ② 直流電流で電気分解および引火しない
- ③ 電極等の他の部位と化学反応しない
- ④ 揮発性が無い
- ⑤ 粘性が少ない
- ⑥ 毒性が無い

等の性質も兼ね備えていなければならない。

ギャップ充填材は、以上の性質を兼ね備えた上で、比誘電率を式 (2・29) で示され

る ϵ_{r_0} の最適値に近付けるようにすればよい。

2) スライダの誘電率の低い部分の推力への影響

ギャップ充填材を用いると、誘電率の高い誘電体の部分にはより強い推力が発生することがわかった。では誘電率の低い誘電体の部分にはどのような影響があるのだろうか。

図 2・15 のように誘電率の高い誘電体の部分が電極の中に引き込まれている場合について考えてみる。図 2・15 にも示すとおり比誘電率の関係はスライダの比誘電率 ϵ_{r_0} のところに誘電率の高い誘電体の比誘電率 ϵ_{r_1} を、誘電率の低い誘電体の比誘電率 ϵ_{r_2} を代入する。ここで $\epsilon_{r_1} > \epsilon_{r_0} > \epsilon_{r_2}$ である。この場合、式 (2・26) を用いると誘電率の高い部分には正の推力すなわち吸引力 F_1 が働く。また誘電率の低い部分には負の推力すなわち押出力 F_2 が働く。したがってスライダの総推力は

$$F_h = F_1 + F_2 \quad (2 \cdot 30)$$

で表わされ、ギャップ充填材の効果が非常に大きいことがわかる。

2・5・5 電極とスライダの幅

電極の幅 W およびスライダの幅 w は式 (2・26) より推力と比例する。したがって電極とスライダの幅はより大きい方がよい。しかしたわみの問題があり、ギャップ管理の面から制限があり、製作しようとしているアクチュエータの大きさと推力とを比較して決定するのが望ましい。

2・5・6 印加電圧

電極への印加電圧 V は式 (2・26) より、その 2 乗した値と推力が比例する。したがって各部位の許容電圧、電流および絶縁耐力を考慮してできるだけ高い印加電圧値にするのが望ましい。

2・6 静電アクチュエータの集積化

これまでは、静電アクチュエータの基本素子の駆動原理について述べてきた。しかし静電気力駆動によるアクチュエータは発生推力が非常に小さいために基本素子単体による駆動は難しい。そこでアクチュエータの基本素子の数を増やしてより大きな推力を得る必要がでてくる。

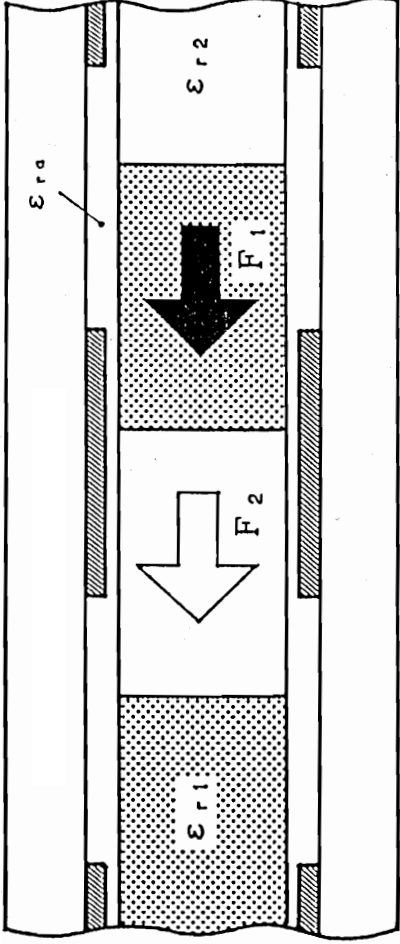
推力の理論式 (2・26) に着目してみると電極の面積に関する寸法 W と L のうち、推力は電極長さ L に依存しない。このことより電極長さ L を短くつめても同じ推力が得られ、基本素子の電極長さを小さくし、その数を増やすことによって、同じ面積のアクチュエータでさらに大きな推力を得られることが理論的に言える。この概念を図 2・16 に示す。

またギャップを小さくし、スライダ厚をそのギャップとスライダおよびギャップ充填材の比誘電率から決定される最適値にすれば、素子そのものの厚さがある程度まで薄くしたほうが推力が増す。このことより基本素子の厚さがある程度まで薄くし、それを重ねることによっても、同じ体積のアクチュエータでさらに大きな推力が得られることが理論的に言える。この概念を図 2・17 に示す。

このように基本素子を小さくしてその数を増やしていくことが静電アクチュエータの集積化を行なう基礎概念である。

静電アクチュエータの基本素子を集積化させた際の推力向上の要因として、以下の 2 項

$$\epsilon_{r2} < \epsilon_{ra} < \epsilon_{r1}$$

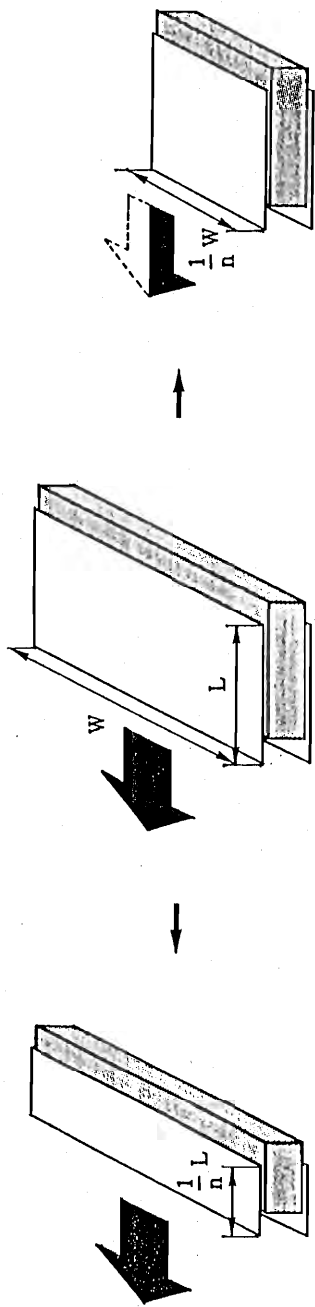


F_1 吸引力

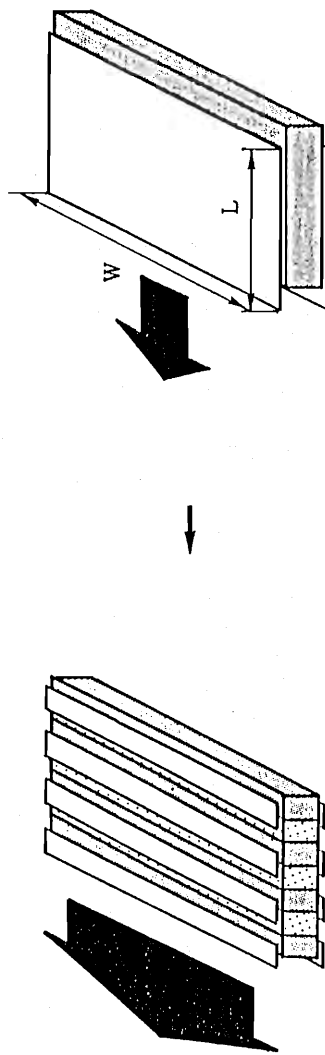
F_2 押出力

総推力 $F_h = F_1 + F_2$

図2・15 ギャップ充填材の比誘電率とスライダの低比誘電率部分の相互関係と発生推への影響

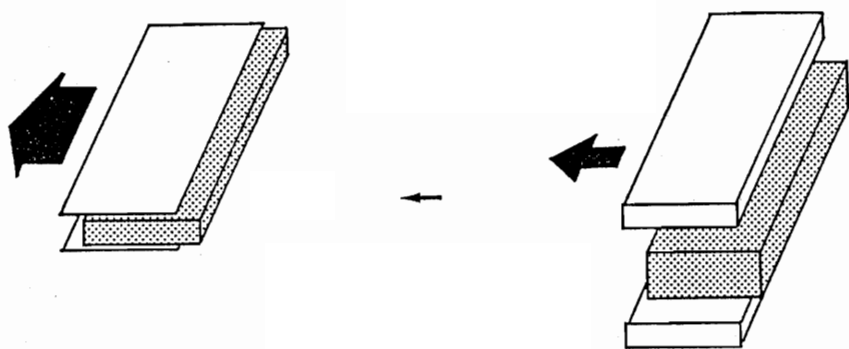


W を $(1/n)$ 倍にすると推力は $(1/n)$ 倍

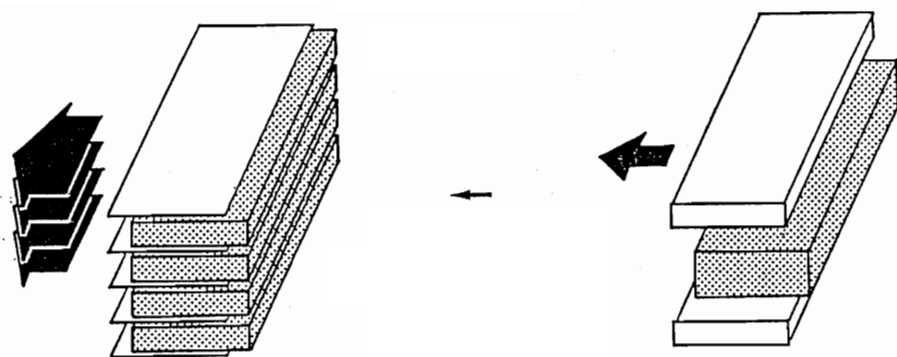


n 分割

図2・16 静電アクチュエータの長さ方向への集積化



素子の厚さをある程度薄くすれば推力は増す



素子の厚さをある程度薄くし、それらを重ねれば、
同体積でさらに大きな推力が得られる

図 2・17 静電アクチュエータの厚さ方向への集積化

目が考えられる。

- ① 電極の長さL
- ② 電極間内外のポテンシャル差（電界密度の差）

2・6・1 電極の長さ

電極の長さLは推力に影響を与えないため、できるだけ小さくすれば、より少ない面積で同じ推力を得ることができる。したがって集積化を図る際は、基本素子の数を増やすために電極の長さLは小さくしたほうがよい。

2・6・2 電極間内外のポテンシャル差

電極間内外のポテンシャル差とは、電極間内と電極間外の電位差（電界密度の差）のことである。電極の形状および材料の違いに伴う等電位線の分布の様子を有限要素法を用いてシミュレーションしたものが図2・18（a）～（d）である。図2・18において（a）と（b）は電極支持体の材料を変えてシミュレーションしたものであり、（c）と（d）は（a）の寸法を縦方向に縮めてシミュレーションしたものである。各図とも、それぞれ電極が最高電位を有し、図の一番下の線が電位=0である。またそれぞれの図が下線に対して線対称になっており、鏡像がそれぞれの図の下方に存在している。

さて電極間内外のポテンシャル差が小さいのは図2・18（b）の場合で、電極が何対あってもあたかも一對の電極しか存在していないような電位分布を示す。また電極間内外のポテンシャル差が大きいのは図2・18（d）の場合で、一枚の電極を包み込むようにして等電位線が分布している。

静電アクチュエータの推力向上に有利なのはこのポテンシャル差が大きい場合である。なぜなら集積化を図る際、せっかく基本素子の数を増やすために電極を細分化しても、ポテンシャル差が小さいと電位は図2・18（b）のような分布を示し、一對の電極の場合と同じ推力しか得られないからである。

また、電極のアスペクト比（縦横比： $AR = \text{電極間距離}D / \text{電極間隔}L_p$ ）を変えて電位分布をシミュレーションしたものを図2・19（a）～（h）に示す。図の左側は電界分離板はなく、右側は電界分離板がある。ここで電界分離板とは独立した電位分布を得るために電極と電極の間に設置する、導電性が高くかつその電位が0となっている物体のことである。

さて、シミュレーション結果より電極のピッチの差異による違いが多少あるものの、おおむね電界分離板がない場合にはアスペクト比は0.5以下、電界分離板がある場合には1以下にするのが望ましい。

以上より、このポテンシャル差を大きくするためには以下の二点に注意する必要があることがわかる。

- ① ギャップ充填材（空気を含む）の体積抵抗よりも電極支持体の体積抵抗を大きくする。
- ② アスペクト比（縦—横比： $AR = \text{電極間距離}D / \text{電極間隔}L_p$ ）を小さくする。できれば0.5以下が望ましい。

2・6・3 端効果の推力への影響

今まで述べてきた発生推力および推力の向上法は端効果を無視した理論式によるものであった。しかし実際はどうかというと、電極板内部での電気力線は完全に一様であるが、

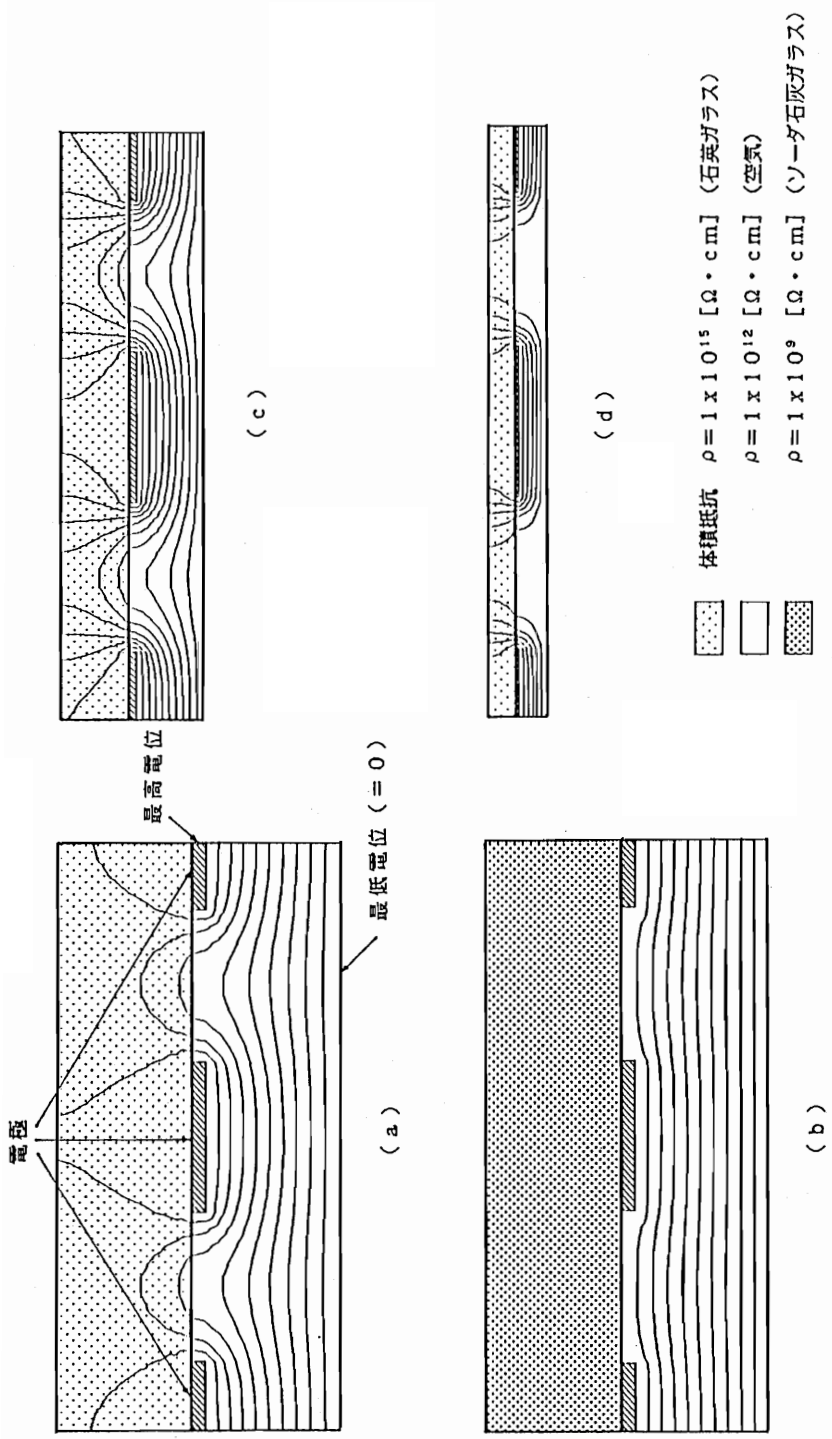


図 2・18 電極の形状および電極支持体材料の違いによる電位分布の変化

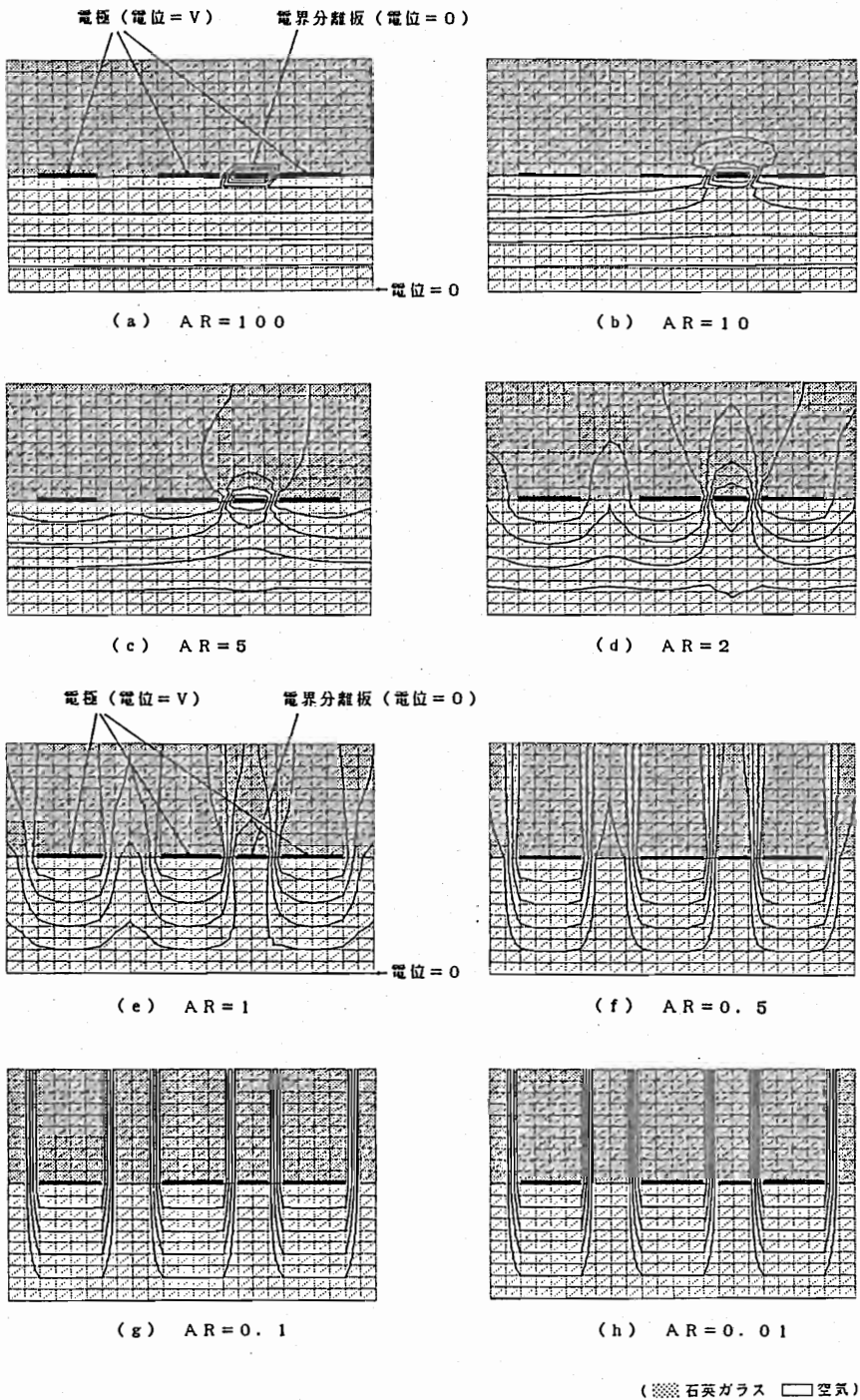


図2・19 電極のアスペクト比の電位分布に与える影響

電極の端部に近付くにつれて一様でなくなる。端効果の様子を図2・20に示す。

端効果によって電極の縁に電荷が溜りコンデンサの静電容量はわずかに増加する。このことをファインマンは端効果を考慮した場合の静電容量を近似的に表わすには電極を人為的に電極間距離の $3/8$ だけ伸ばして得られる面積を使えば得られるとしている。一對の電極で静電アクチュエータを構成する基本素子の場合はこの静電容量の増加が推力の増加につながる。しかし基本素子の集積化を図る際は端効果によって電極が見かけより大きくなる、すなわち電極間内外のポテンシャル差が小さくなるので不利に働く。端効果を完全になくすことは不可能であるので、電極を集積化する際は有限要素法や境界要素法などの数値計算によって、端効果が推力に影響を及ぼさないことを確認する必要がある。

2・7 結言

この章では静電アクチュエータの推力の理論式を導いた。その結果静電アクチュエータについて以下のことがわかった。

- ① 理論式上では静電アクチュエータを駆動することが可能であること。
- ② 基本素子を小形化するとより力が増すこと。
- ③ 集積化することによって実用に耐えうる新しいアクチュエータとなり得ること。

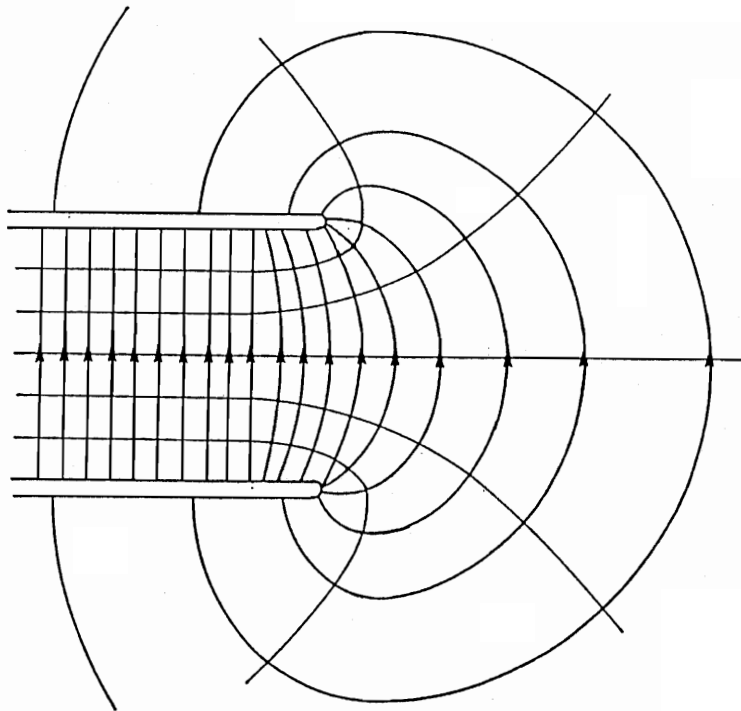


図2・20 電極の端効果と電位分布

第3章 静推力実験

3・1 緒言

第2章で静電アクチュエータの駆動原理を確立した。ここでは、目標とする静電アクチュエータの拡大基本素子を製作し、その静特性実験を行ない、その結果によって前章で求めた理論式の信頼性を確かめ、また今後静電アクチュエータの開発に際し問題となる点を検討した。

3・2 実験の目的

3・2・1 概略

静電アクチュエータを実現するためには、まずその基本素子（単体モデル）の確立が必要である。それには本実験を通して、将来最も効率の良い基本素子を設計、製作するための基礎データを得なければならない。そこで本実験ではスライダの挿入量に対するステータの持つ静電容量の変化量（この比率は静推力に正比例する）を測定することにより

- ① どれほどの静推力が得られるかを確認し、理論式の信頼性を確認する。
- ② コンデンサの端効果の静推力への影響を調べ、基本素子のスケールやスライダおよび電極のピッチにどの程度の影響を及ぼすか検討する。
- ③ 隣接する電極どうしの相互作用を調べる。
- ④ ギャップ充填材の静推力向上効果とその問題点を検討する。

ことを目的とした。

以上の4項目に主眼を置き、それらを調べるために以下の3つの実験を行なった。

- a) 1電極タイプにおける静推力実験
- b) 2電極タイプにおける静推力実験
- c) ギャップ充填材中における静推力実験

3・2 1電極タイプにおける静推力実験

一対の電極を有する1電極タイプのステータを用い、スライダを徐々に挿入しながら、他の電極の影響を受けない状態での静推力を測定し、前記の①、②について検討することを実験の目的とした。

3・2・3 2電極タイプにおける静推力実験

集積化の足がかりとして、二対の電極を有する2電極タイプのステータを用い、スライダを挿入しながら、他の電極の影響を受ける2電極状態における静推力を測定し、前記の②、③について検討することを実験の目的とした。

3・2・4 ギャップ充填材中における静推力実験

静推力の向上を図るために、2電極タイプのステータを用い、電極をギャップ充填材中に浸した状態における静推力を測定し、前記の①、②、③、④について検討することを実験の目的とした。

3・3 実験装置

3・3・1 静推力の測定

測定可能な程度の推力を発生することのできる可動素子を製作するためには、スライダとなる誘電体、およびステータとなる電極の加工・組立が非常に難題となる。一方、加工の容易な広いギャップを持つ素子にした場合は発生推力が非常に小さく直接測定が困難である。そこで上記制約から、本実験ではまず加工・組立が比較的簡単な拡大基本素子を製作し、微小な静推力を直接測定する代わりに、誘電体と電極の位置関係に対する静電容量を測定し、その変化から静推力（正確には以下に述べる推力係数）を計算で求めることにした。

3・3・2 推力係数

静電容量をスライダの位置の関数として測定すれば、その変化から推力が計算で求められるのは以下の理由による。

静電リニアアクチュエータの推力 F_h は

$$F_h = - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial C(X)}{\partial X} \cdot V^2 \quad (3 \cdot 1)$$

で表わすことができることはすでに前章で述べた。この式 (3・1) より静電容量 $C(X)$ と挿入量 X を測定すれば、電圧 V に適当な値を代入してやることによって推力 F_h が求められる。そこでこの $\partial C(X) / \partial X$ を今後、推力係数と呼ぶことにする。したがって静推力は推力係数に $V^2 / 2$ を掛けることによって求められる。

3・3・3 実験装置の構成

静電アクチュエータの拡大基本素子の静推力を測定するために用いた実験装置は、スライダとなるセラミクス製誘電体、ステータとなる石英ガラス製電極支持体とそこにニッケルを蒸着した電極、スライダを電極内に挿入するためのXYZテーブル、電極間の静電容量を測定するためのインピーダンスアナライザ等で構成されている。空気中における静推力測定はスライダを水平方向に挿入するために、図3・1のような装置を用いた。またギャップ充填材を使用する際は拡大基本素子を充填材の容器中に没して実験を行なうため、スライダを水平に挿入できない。そこで図3・2のようなスライダを垂直に挿入できる装置を用いた。

3・3・4 ステータ（電極と電極支持体）

ステータは石英ガラス製の電極支持体にニッケルを電極として蒸着させて製作した。電極支持体に石英ガラスを用いたのは電極内外のポテンシャル差を大きくするためである。すなわち $2 \cdot 6 \cdot 2$ より、空気中において電極内外のポテンシャル差を大きくするには、空気 ($\rho = 1 \times 10^{12}$ [$\Omega \cdot \text{cm}$]) より体積抵抗の大きい石英ガラス ($\rho = 1 \times 10$ [$\Omega \cdot \text{cm}$]) を用いるのが効果的であるからである。

(1) 1電極タイプ

一対の電極を有するステータで電極の寸法は、幅 $W = 101$ [mm]、長さ $L = 36$ [mm]、電極の膜厚は 0.9952 [μm] である。

(2) 2電極タイプ

二対の電極を有するステータで電極の寸法は各々幅 $W = 20$ [mm]、長さ $L = 10$ [mm] である。電極間隔 $L_p = 2, 5, 10$ [mm] の3種類を製作した。その電極の膜

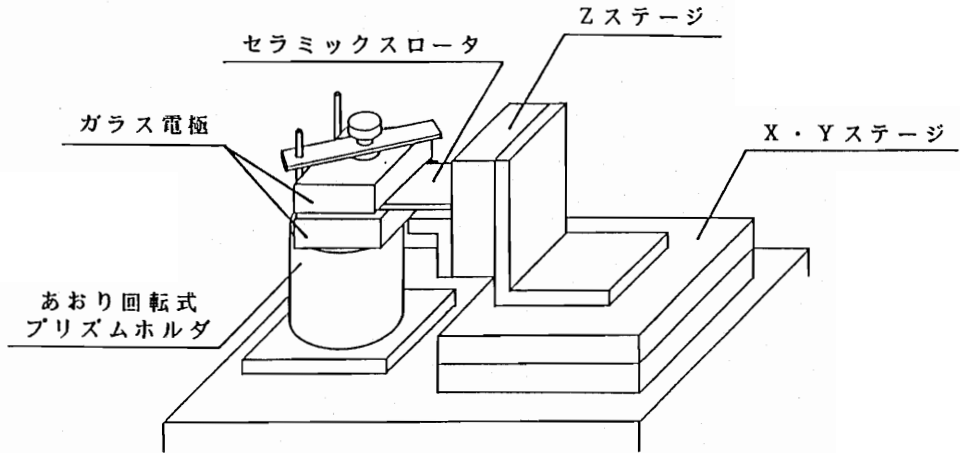


図3・1 空気中での推力実験装置

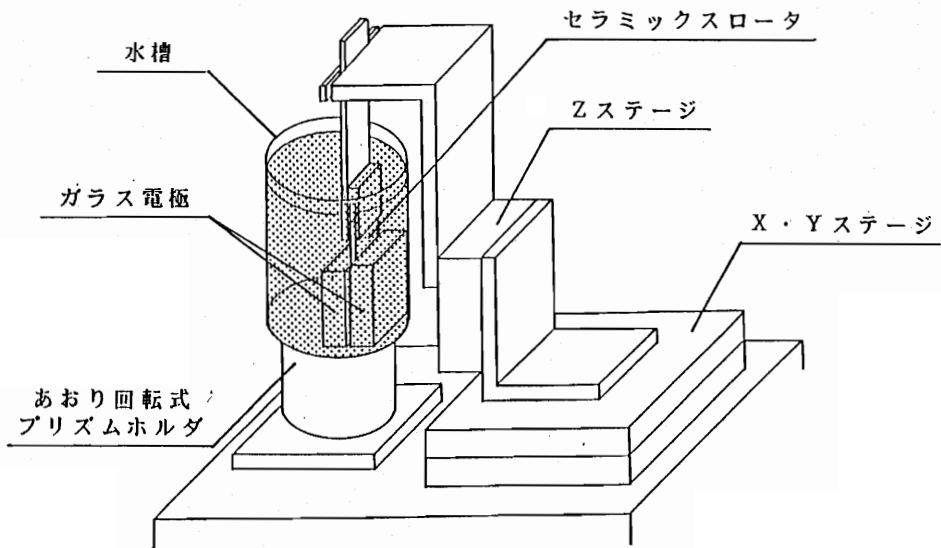


図3・2 液中での推力実験装置

厚はそれぞれ0.9659, 0.9233, 0.992 [μm]である。

なお2電極タイプのステータにおいてスライダを挿入していった際、最初に挿入される電極をA電極、他方をB電極と名付ける。また、電極と電極支持体との境界部を図3・3のごとく挿入方向より順に電極境界部EAi, 電極境界部EAo, 電極境界部EBi, 電極境界部EBoと名付ける。

3・3・5 スライダ

スライダにはセラミクス系誘電体を用いることにした。使用したセラミクスの成分を表3・1に示す。

表3・1 スライダ(誘電体)の素材

材料	$(\text{Pb}_{0.98}\text{Ba}_{0.02})(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$
比誘電率	12000
比重	7.7~7.8
焼結前の粒径	1 μm

このセラミクスを素材として、次の3種類のスライダを製作した。

(1) 1電極タイプ

1電極タイプの実験用のスライダで、すべてがセラミクス系誘電体のみからなっている。スライダの寸法は幅 $w=100$ [mm], 長さ $l=38$ [mm], 厚さ $d=1.000$ [mm]である。

(2) 2電極タイプ

2電極タイプの実験用のスライダで、セラミクス系誘電体のみからなっている。スライダの寸法は幅 $w=20$ [mm], 長さ $l=50$ [mm], 厚さ $d=1.000$ [mm]である。

3・3・6 測定装置

静電アクチュエータの静推力を求めるためには電極間の静電容量を測定しなければならない。この拡大基本素子の静電容量を理論式(2・10)を用いて計算すると、表3・2に示されるような値になる。そこで最大分解能が0.1 [fF]のインピーダンスアナライザを用いた。また電極とインピーダンスアナライザは浮遊容量を拾わないようにシールド線をつないだ。

表3・2 理論式による静電容量の計算値

	スライダ挿入前	スライダ全挿入後
1電極タイプ	31.55 pF	1586.70 pF
2電極タイプ	1.74 pF	88.13 pF

3・3・7 ステータ周辺装置

ステータにスライダを円滑に挿入するために、ステータ周辺装置はステータの位置決め

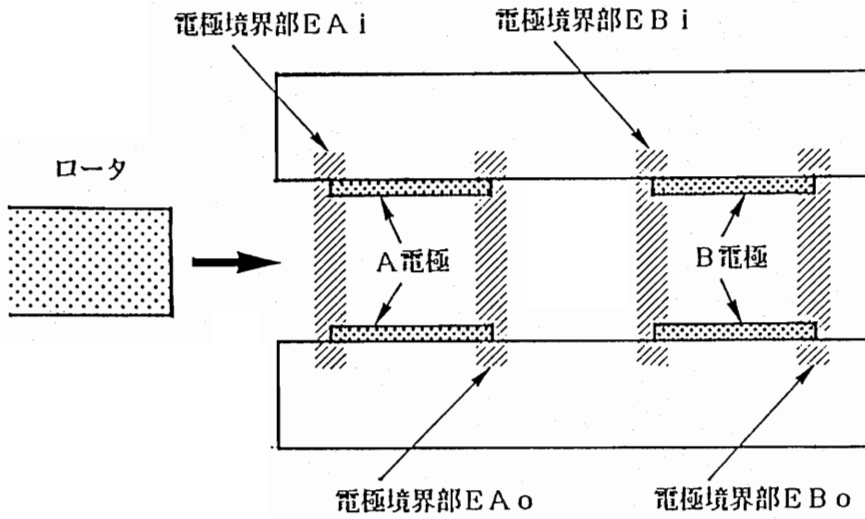


図3・3 2電極タイプの電極境界部

表3・3 ギャップ充填材の主な物性値

	空気	水	炭酸プロピレン	N-メチルホルムアミド (NMF)
比誘電率	1	80	69.0	182.4
沸点 °C	——	100	242	180~185
融点 °C	——	0	-48.8	-3.8
比重	——	1	1.21 (20 °C)	1.00 (20 °C)
粘性率 cP	——	0.89 (25 °C)	1.38 (40 °C)	1.73 (25 °C)
蒸気圧 mmHg	——	23.8 (25 °C)	——	0.4 (44 °C)
引火点 °C	——	——	160	——

および固定するためのあおり回転式プリズムホルダ、スライダをステータに挿入するためのXYZテーブル、これらの機器を固定するJIS2級の防振台で構成されている。スライダの固定は、空気中における測定では石英ガラス製のテーブル、ギャップ充填材中における測定ではアクリル製のアダプタによって行なった。

3・3・8 ギャップ充填材

ギャップ充填材は推力を増す効果があるばかりでなく、スライダと電極との摩擦低減作用およびギャップ管理が期待できる。このギャップ充填材は2・5・4で述べたような項目に注意して選択しなければならない。

その結果これらの項目をある程度まで満足する純水、炭酸プロピレン、N-メチルホルムアミドの3種をギャップ充填材として使用することにした。ギャップ充填材についての詳細を表3・3に示す。

3・4 実験方法

前述のように推力係数はスライダの挿入量に対する静電容量の変化量であるから、スライダの挿入量と静電容量を測定すれば求められる。すなわちスライダの挿入量はXYZテーブルに取り付けられているマイクロメータによって、静電容量はインピーダンスアナライザを用いて測定すれば計算によって推力係数が求められるわけである。なお、静電容量を測定する際、インピーダンスアナライザの測定条件は次のように設定した。

測定周波数・・・100 [kHz]
電圧設定値・・・1 [V]
内部DCバイアス電圧・・・0 [V]

3・4・1 1電極タイプにおける静推力実験

1電極タイプ実験用スライダを電極の手前2 [mm] の位置に置き静電容量を測定した。測定が終わったらスライダをXYテーブルとともに移動させ徐々に電極内に挿入し挿入量を決定した後、同様の測定を行なった。スライダは6 [mm] まで挿入した。ただし電極の端部ではより細かく移動させた。

3・4・2 2電極タイプにおける静推力実験

(1) A電極測定

2電極タイプ実験用スライダをA電極（電極境界部EAi側）の手前2 [mm] の位置に置き、B電極の末端を大気開放した状態と短絡した状態の、それぞれにおけるA電極の静電容量を測定した。測定が終わったらスライダをXYテーブルとともに移動させ徐々に電極内に挿入し挿入量を決定した後、同様の測定を行なった。スライダはA電極を2 [mm] 程度突き抜けた位置（電極境界部EAo側）まで移動させた。この一連の操作を電極間隔 $L_p = 2, 5, 10$ [mm] の3種類のステータについて行なった。ただし電極の端部ではより細かく移動させた。

B電極の末端を大気開放した状態と短絡した状態の、それぞれにおける静電容量を測定する目的は、隣接する電極どうしの相互作用を調べるためである。すなわち将来集積化を行なった際、充放電に関係のない電極を短絡したままにしておいた方が良いのか否かを調べるために行なった。

(2) B電極測定

A電極測定と同じことをB電極についても行なった。すなわち、2電極タイプ実験用スライダをB電極（電極境界部E B i側）の手前2 [mm] の位置から徐々に挿入し挿入量を決定した後、A電極の末端を大気に開放した状態と短絡した状態の、それぞれにおけるB電極の静電容量を測定した。測定はB電極を2 [mm] ほど突き抜けた位置（電極境界部E B o側）まで行なった。この一連の操作を電極間隔 $L_p = 2, 5, 10$ [mm] の3種類のステータについて行なった。ただし電極の端部ではより細かく移動させた。

3・4・3 ギャップ充填材中における静推力実験

ギャップ充填材（純水、炭酸プロピレン、N-メチルホルムアミド）を満たした容器中に2電極タイプ用ステータを沈めておき、Zテーブルにアダプタを介して固定した2電極タイプ用スライダを上下に移動させて3・4・2と同様の実験を行なった。すなわち2電極タイプの静推力実験において空気をギャップ充填材に置き換えて同じ実験を行なったわけである。

3・5 実験結果

3・5・1 1電極タイプにおける静推力実験

スライダの挿入量と静電容量および推力係数の関係を図3・4に示す。

静電容量はスライダの挿入量にほぼ比例して増加した。したがって推力係数は挿入量に関わらず一定値 ($F_h \approx 3.2$ [pF/mm]) を示した。この値は理論値 $F_h = 4.3.2$ [pF/mm] より25 [%] ほど小さかった。

また、電極の入口付近 ± 0.3 [mm] の範囲では推力係数がなめらかに増加した。

スライダ挿入中の推力係数の測定結果の平均値と理論式により求めた理論値を表3・4に示す。

3・5・2 2電極タイプにおける静推力実験

電極間隔 $L_p = 2, 5, 10$ [mm] の電極におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数の関係をそれぞれ図3・5～図3・7に示す。

静電容量はスライダの挿入量に比例して増加した。したがって推力係数は挿入量に関わらず一定値 ($F_h \approx 1.1$ [pF/mm]) を示した。推力係数の理論値は $F_h = 8.64$ [pF/mm] であるので25 [%] ほど大きな値が得られたことになる。ただし図3・9においてB電極の静電容量が他の電極に比べて小さな値 ($F_h \approx 6$ [pF/mm]) を示しているが、これはA電極測定後電極支持体とスペーサが剥がれてしまい、接着剤にて接着し、電極間距離が接着剤の分だけ大きくなったままB電極の静電容量を測定したために小さな値を示したものと考えられる。このことに関しては3・6・2で詳しく述べる。この後のギャップ充填材中における実験結果も同様である。

電極間隔に関わらず推力係数は、A電極においてはB電極を大気に開放しても短絡しても同じ値を示したが、B電極においてはA電極を大気開放した場合に比べて、A電極を短絡するとスライダの挿入量が少ないほど推力係数が小さくなった。

スライダ挿入中の推力係数の測定結果の平均値と理論値を表3・5に示す。

3・5・3 ギャップ充填材中における静推力実験

1) ギャップ充填材に純水を用い、電極間隔 $L_p = 2, 5, 10$ [mm] のときのスライダの挿入量と静電容量および推力係数の関係を、それぞれ図3・8～図3・10に示す。

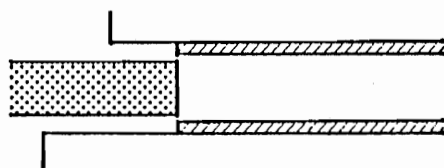
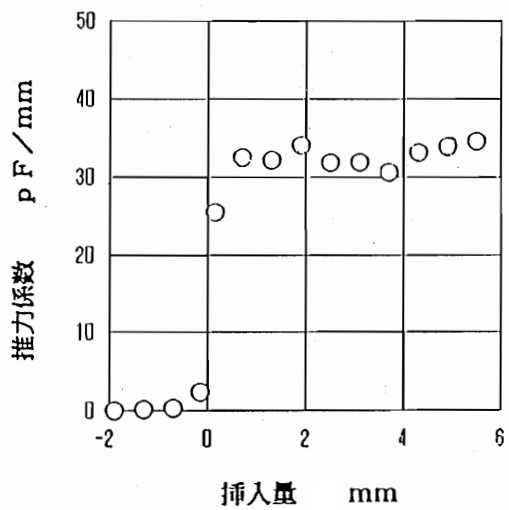
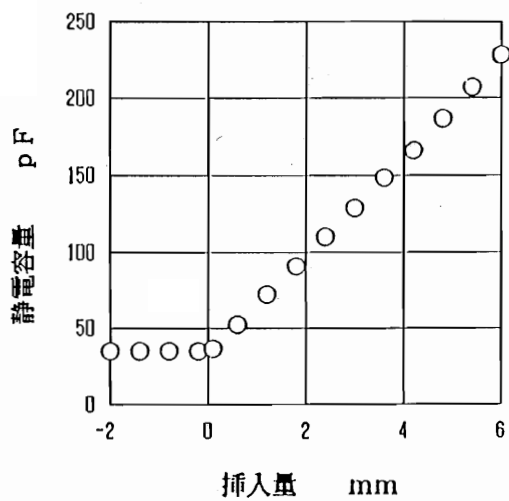
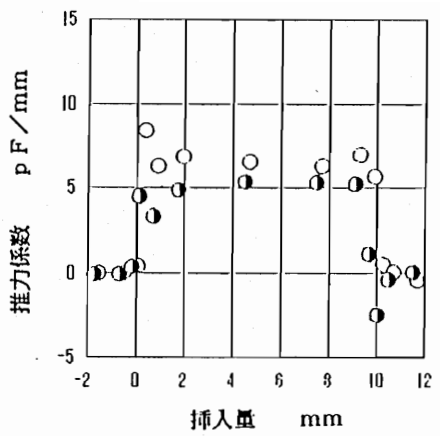
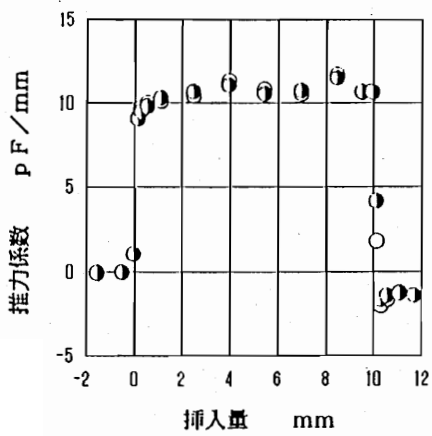
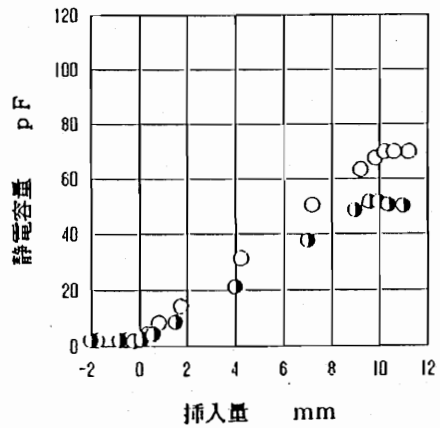
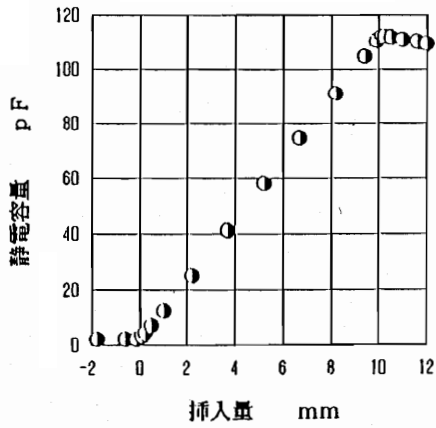


図3・4 空気中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係 (1電極タイプ)



○ B電極は大気開放
● B電極は短絡

○ A電極は大気開放
● A電極は短絡

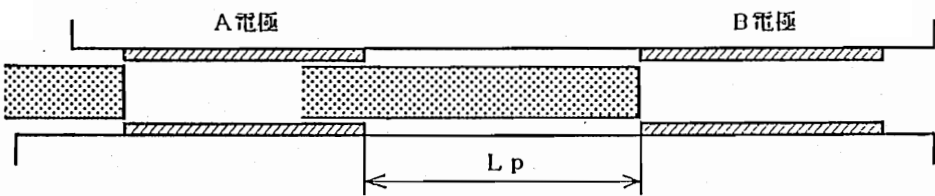
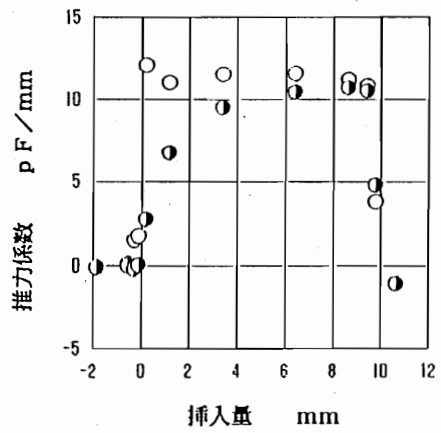
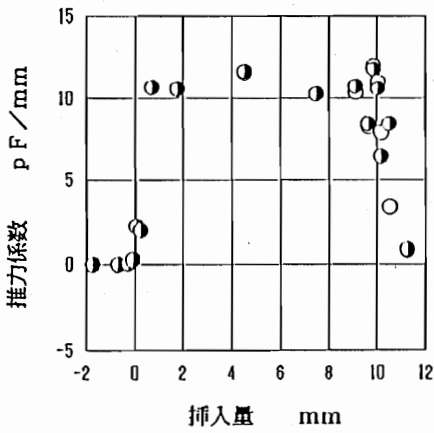
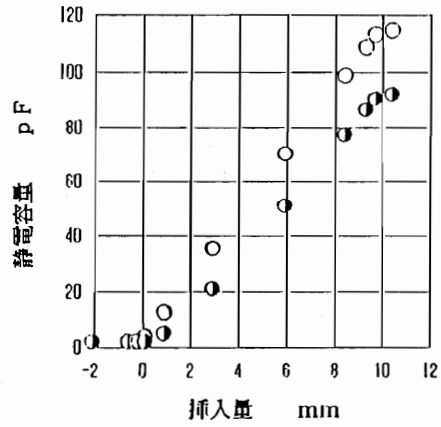
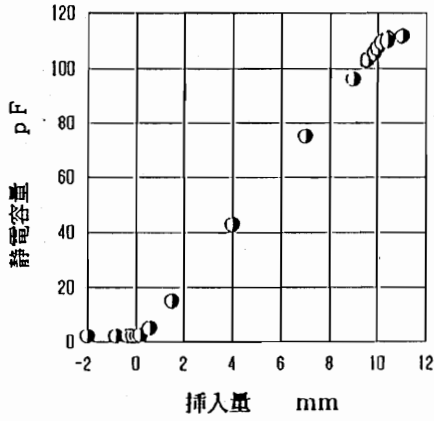


図3・5 空気中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係 (2電極タイプ 電極間隔 $p=2$ [mm])



○ B電極は大気開放
● B電極は短絡

○ A電極は大気開放
● A電極は短絡

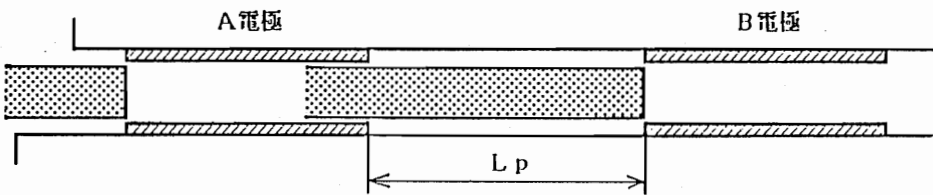


図3・6 空気中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係
(2電極タイプ 電極間隔 $p=5$ [mm])

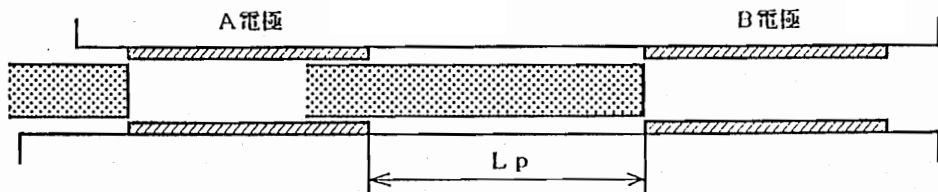
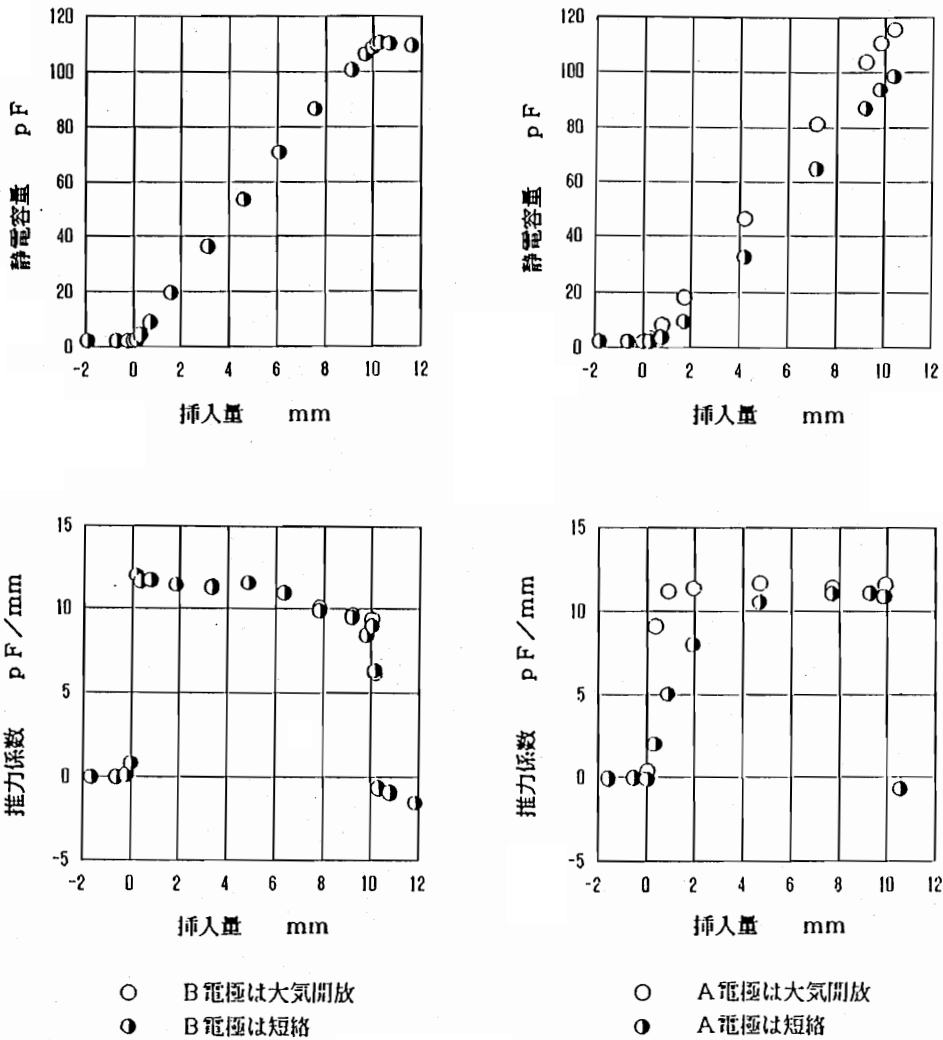
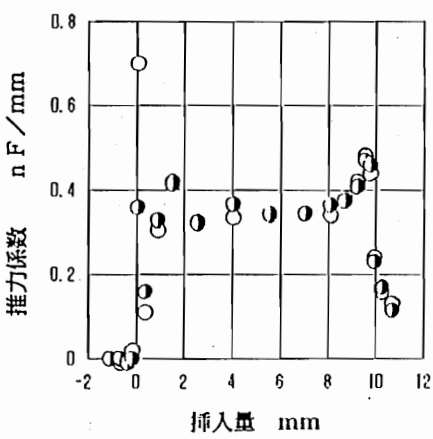
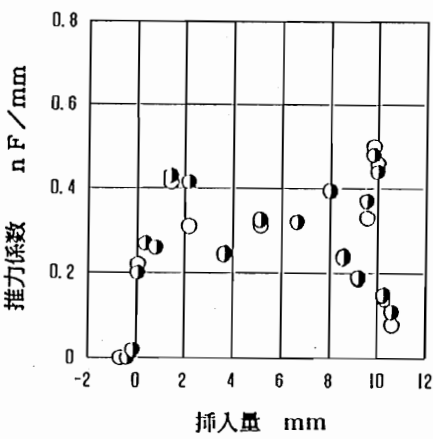
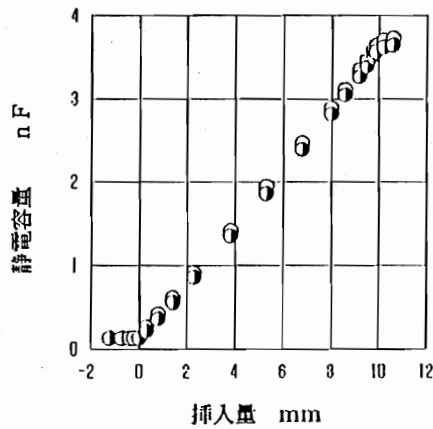
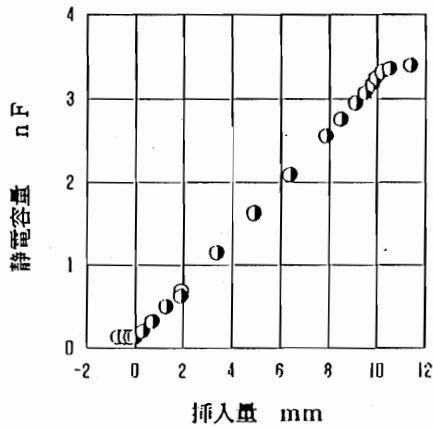


図3・7 空気中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係
(2電極タイプ 電極間隔 $p=10$ [mm])



○ B電極は大気開放
● B電極は短絡

○ A電極は大気開放
● A電極は短絡

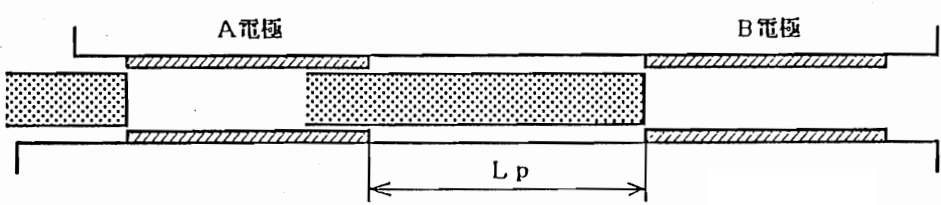


図3・8 純水中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係
(2電極タイプ 電極間隔 $L_p = 2$ [mm] 純水の体積抵抗率 $\rho = 900$ [$K\Omega \cdot cm$])

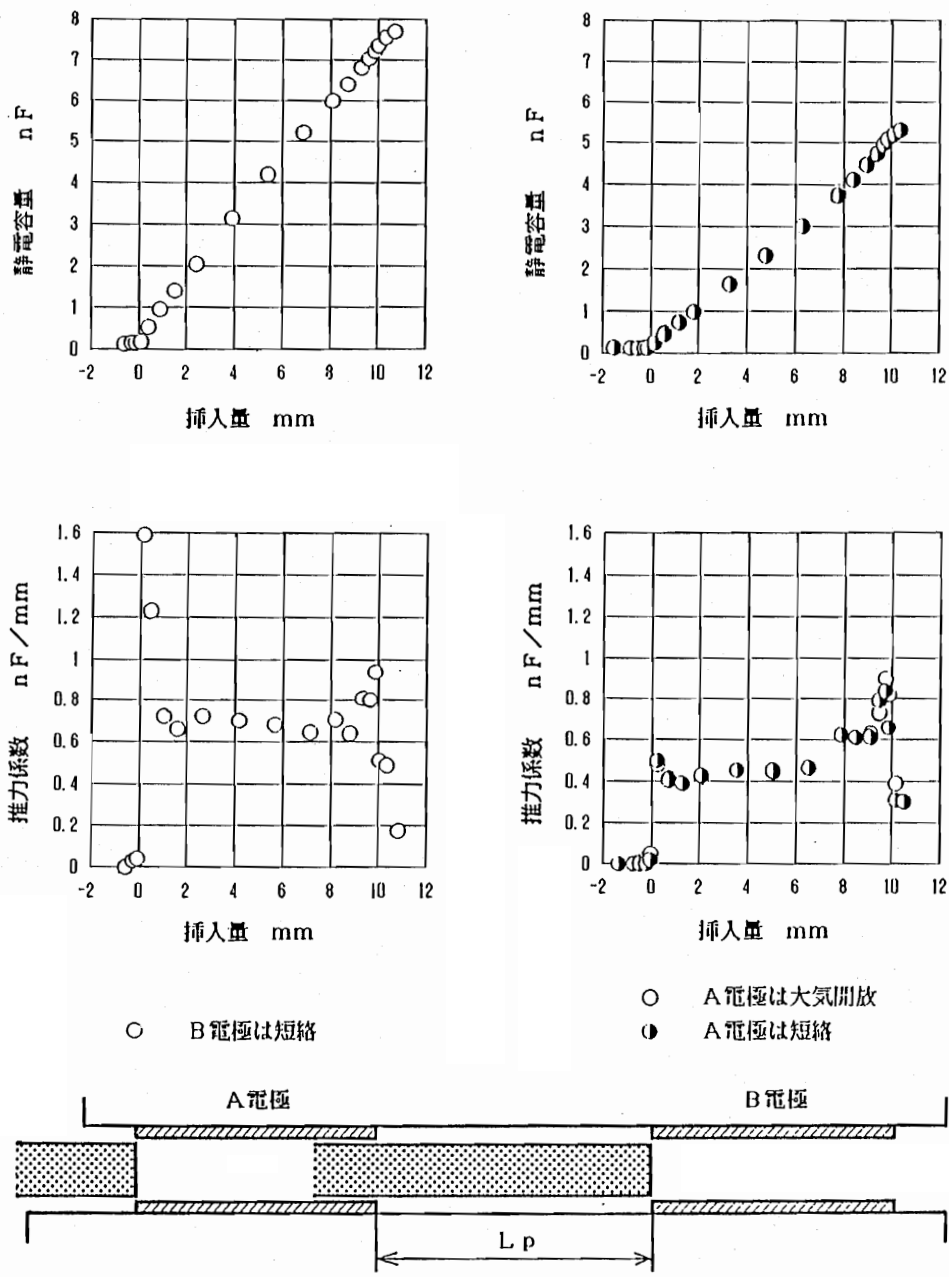
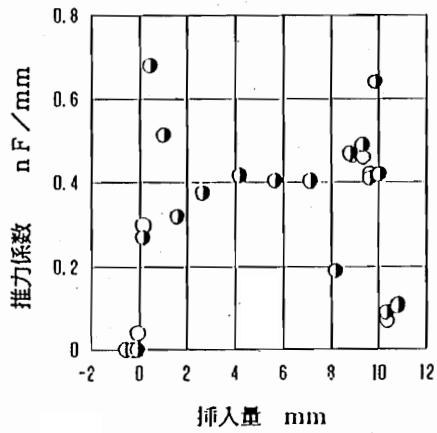
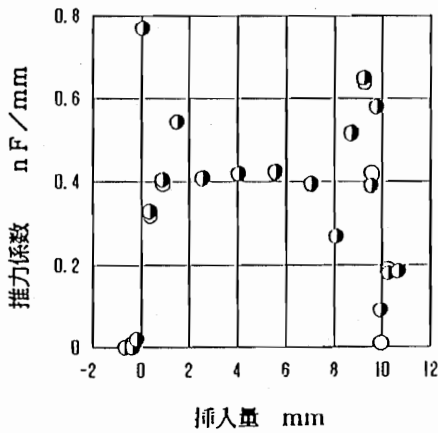
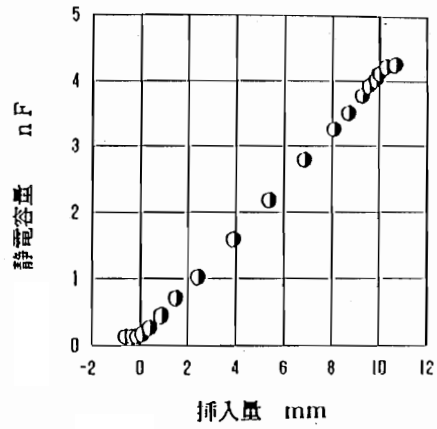
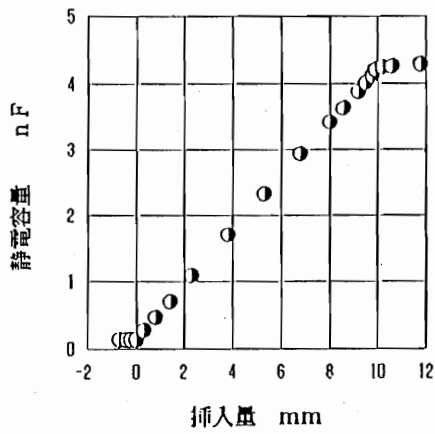


図3・9 純水中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係
 (2電極タイプ 電極間隔 $p=5$ [mm] 純水の体積抵抗率 $\rho=950$ [$K\Omega \cdot cm$])



○ B電極は大気開放
● B電極は短絡

○ A電極は大気開放
● A電極は短絡

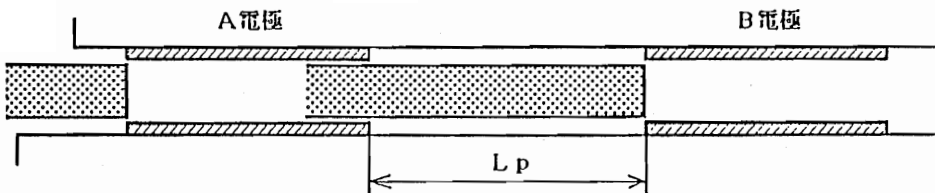


図3・10 純水中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係
(2電極タイプ 電極間隔 $p=10$ [mm] 純水の体積抵抗率 $\rho=1000$ [$K\Omega \cdot cm$])

静電容量はスライダの挿入量にほぼ比例して増加した。したがって推力係数は挿入量に関わらず一定値を示した。しかし推力係数の値は各電極によってまちまちで、推力係数の理論値 ($Fh = 0.517 \text{ [pF/mm]}$) より大きかったり小さかったりで、 $3 \cdot 5 \cdot 2$ の結果がまとまった値を示したのに対して変動が大きいと言える。

A電極での測定においては空気中における測定同様、B電極を大気開放しても短絡しても推力係数に変化がみられなかったばかりか、B電極の測定において、A電極を大気開放しても短絡しても推力係数はほとんど変化しなかった。

スライダ挿入中の推力係数の測定結果の平均値と理論値を表3・5に示す。

2) ギャップ充填材に炭酸プロピレンを用い、電極間隔 $L_p = 2, 10 \text{ [mm]}$ のときのスライダの挿入量と静電容量および推力係数の関係をそれぞれ図3・11～図3・12に示す。

スライダ挿入中の推力係数の測定結果の平均値と理論値を表3・5に示す。

3) ギャップ充填材にN-メチルホルムアミドを用い、電極間隔 $L_p = 10 \text{ [mm]}$ のときのスライダの挿入量と静電容量および推力係数の関係を図3・13に示す。

スライダ挿入中の推力係数の測定結果の平均値と理論値を表3・5に示す。

3・6 考察

3・6・1 推力の理論式の妥当性

1電極タイプのステータでのスライダの挿入量と静電容量および推力係数の結果(図3・4および表3・4)より、測定結果と理論値に多少の誤差はあるものの、推力係数はスライダ挿入前では0であり、一旦スライダを挿入するとその挿入量に関わらず一定となる傾向がみられる。したがって、推力はスライダの挿入量に関わらず一定であるという理論どおりの傾向を示していると言え、理論式(2・14)の妥当性が認められた。

また、ギャップ充填材中における2電極タイプステータでのスライダの挿入量と静電容量および推力係数の結果(図3・8～図3・13および表3・5)より、測定結果と理論値に多少の誤差はあるものの、ギャップ充填材を使用することによって推力係数が空気中でのそれよりもかなり増加している。このようにギャップ充填材を使用することによって推力の向上が図れるという理論通りの傾向を示しており、理論式(2・26)は妥当であると言える。

3・6・2 静電容量および推力係数の測定値と理論値との誤差

静電容量と推力係数の測定結果を空気中、純水中、他のギャップ充填材中のそれぞれについて図3・14～図3・16にまとめた。図3・14で実線は空気中、図3・15で実線は純水中、図3・16で実線、破線、一点鎖線はそれぞれ炭酸プロピレン中、純水中、N-メチルホルムアミド中での理論値である。これらの図と表3・4、表3・5を見ると、理論値どおりの値を示しているものはない。この原因について以下に考察した。

(1) 空気中での測定誤差

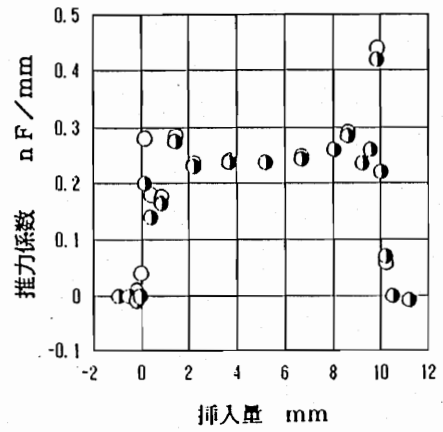
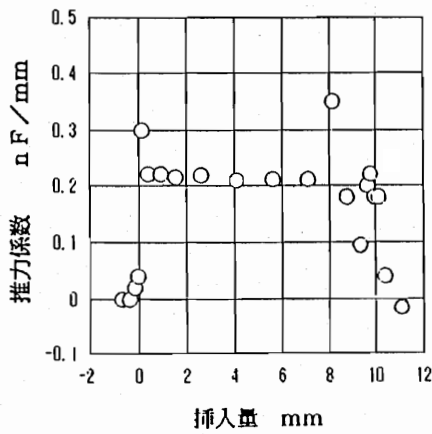
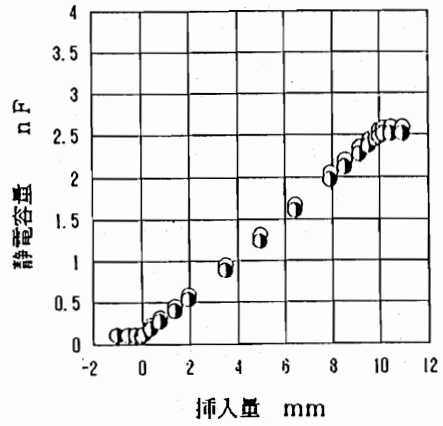
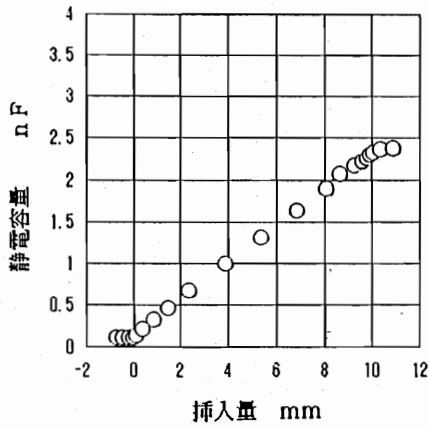
表3・4、表3・5および図3・14を見ると、空気中においては1電極タイプ、2電極タイプとも静推力の測定結果と理論値にはかなりの誤差がある。この測定誤差の関係する要因として以下のようなことが考えられる。

表3・4 推力係数の測定結果と理論値 (1電極タイプ)

測定結果	理論値
32.0 pF/mm	43.2 pF/mm

表3・5 推力係数の測定結果と理論値 (2電極タイプ)

ギャップ充填材	体積抵抗率 kΩ・cm	電極間隔 mm	非測定電極 の状態	A電極の推力係数	B電極の推力係数	推力係数の理論値
空気 $\epsilon_{rs} = 1$		2	大気開放	10.92 pF/mm	6.65 pF/mm	8.64 pF/mm
			短絡	10.92	4.98	
			大気開放	10.78	11.22	
			短絡	10.68	9.06	
			大気開放	10.66	11.07	
短絡	10.66	9.38				
純水 $\epsilon_{rs} = 80$	900	2	大気開放	0.313 nF/mm	0.353 nF/mm	0.517 nF/mm
			短絡	0.313	0.347	
			大気開放	—	0.503	
			短絡	0.721	0.501	
			大気開放	0.407	0.397	
短絡	0.408	0.396				
炭酸プロピレン $\epsilon_{rg} = 69$	750	2	大気開放	—	0.244	0.462
			短絡	0.220	0.237	
			大気開放	0.309	0.315	
短絡	0.309	0.314				
N-メチル ホルムアミド $\epsilon_{rg} = 182.4$	2.4	10	大気開放	—	1.534	0.886
			短絡	1.575	1.534	



○ B電極は短絡

○ A電極は大気開放

● A電極は短絡

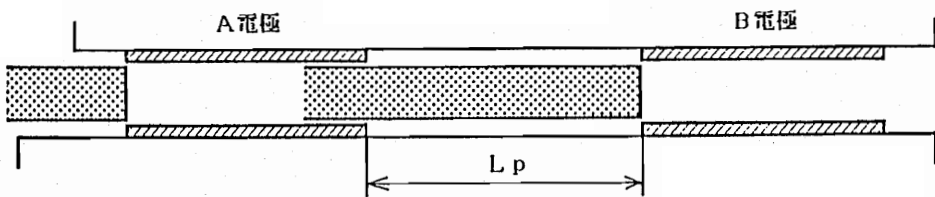
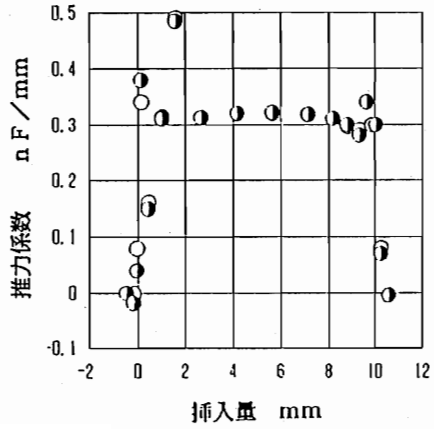
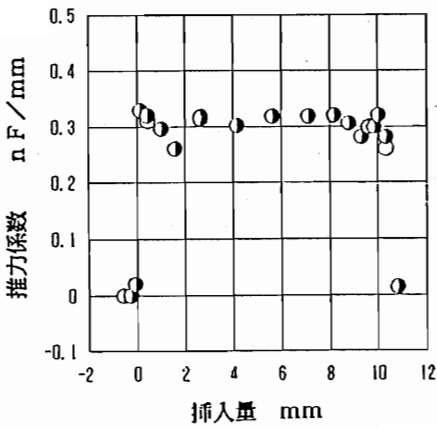
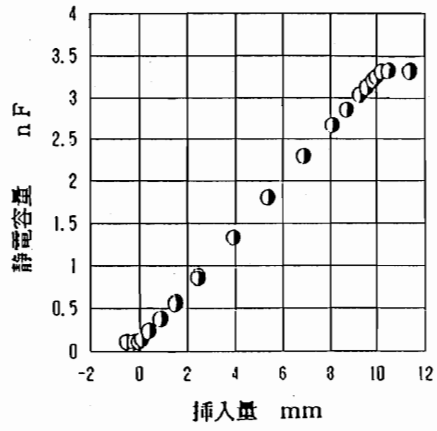
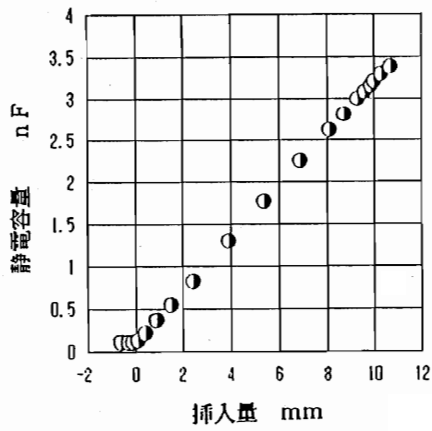


図3・11 炭酸プロピレン中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係

(2電極タイプ 電極間隔 $p=2$ [mm] 炭酸プロピレンの体積抵抗率 $\rho=750$ [K Ω ·cm])



- B電極は大気開放
- B電極は短絡

- A電極は大気開放
- A電極は短絡

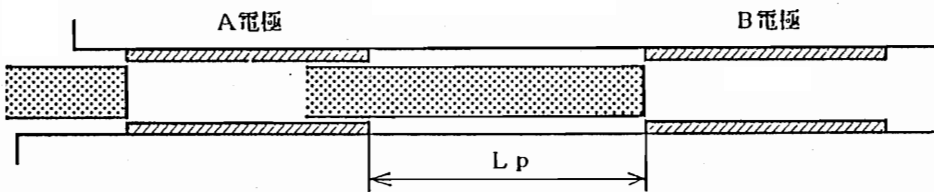


図3・12 炭酸プロピレン中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係
 (2電極タイプ 電極間隔 $L_p=10$ [mm] 炭酸プロピレンの体積抵抗率 $\rho=750$ [K $\Omega \cdot$ cm])

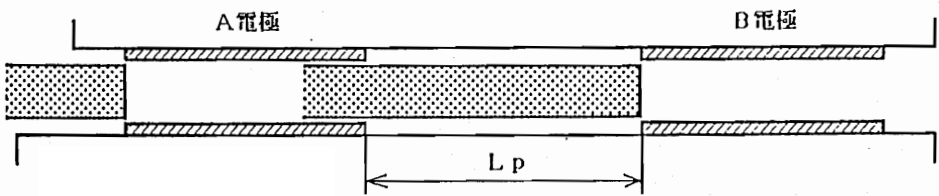
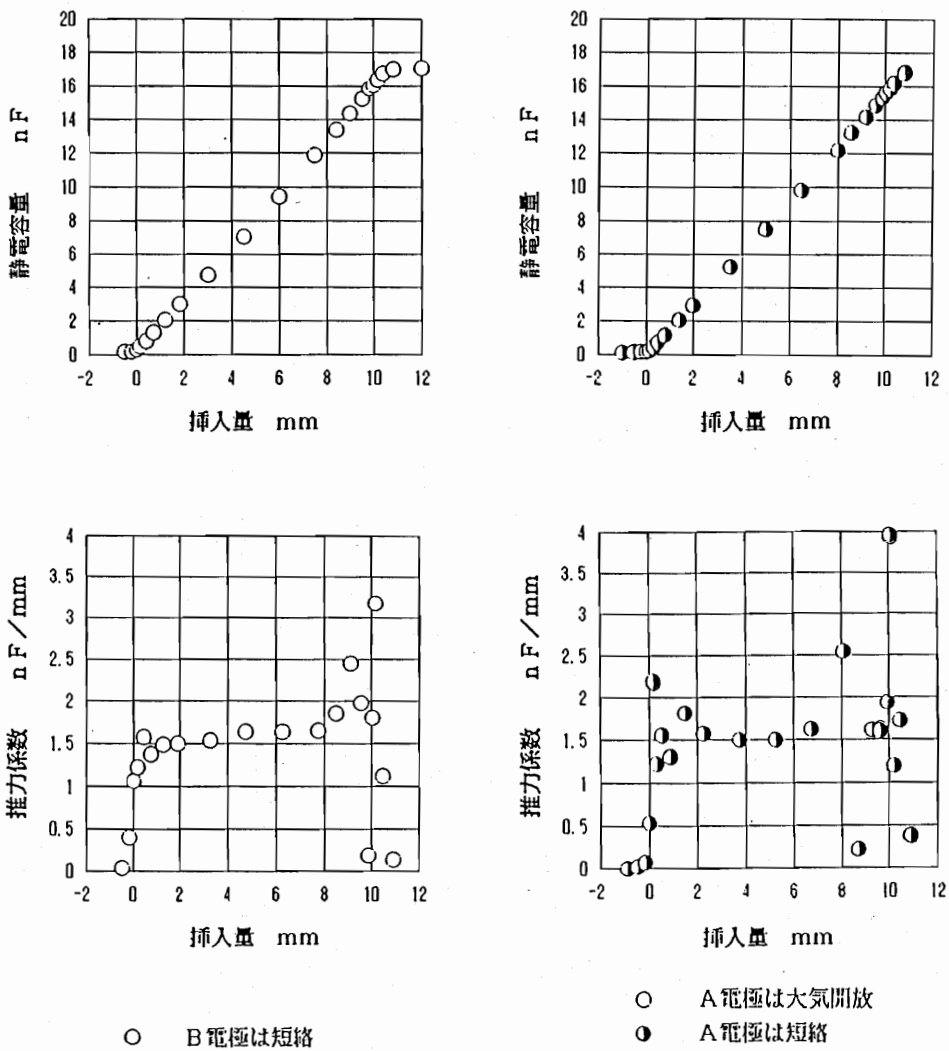
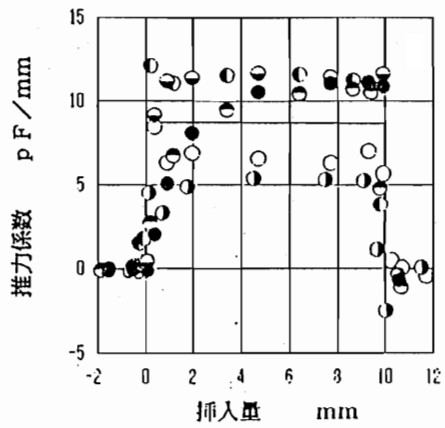
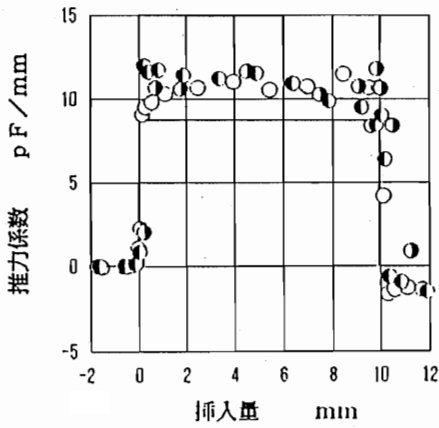
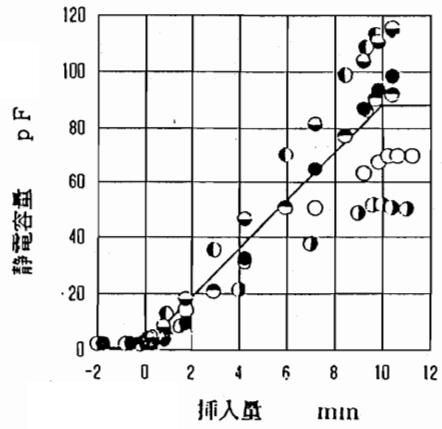
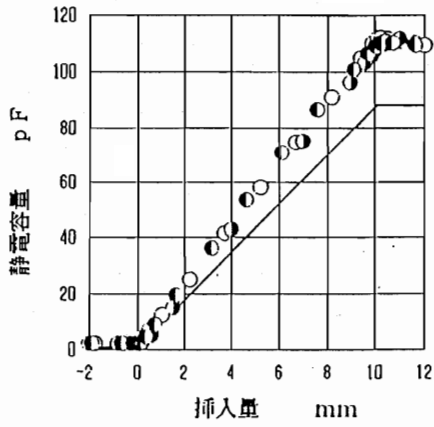


図3・13 N-メチルホルムアミド中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係
 (2電極タイプ 電極間隔 $L_p=10$ [mm] N-メチルホルムアミドの体積抵抗率 $\rho=2.4$ [$K\Omega \cdot cm$])



- $L_p = 2$ mm B電極は大気開放
- $L_p = 5$ mm //
- $L_p = 10$ mm //

- $L_p = 2$ mm A電極は大気開放
- $L_p = 2$ mm A電極は短絡
- $L_p = 5$ mm A電極は大気開放
- $L_p = 5$ mm A電極は短絡
- $L_p = 10$ mm A電極は大気開放
- $L_p = 10$ mm A電極は短絡

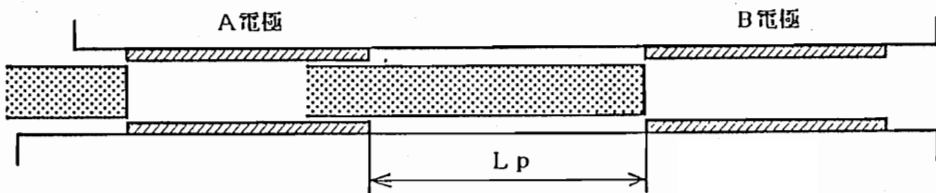
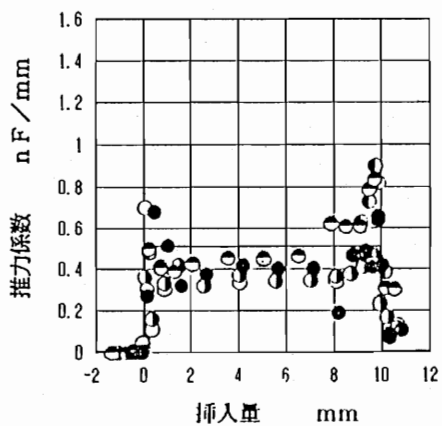
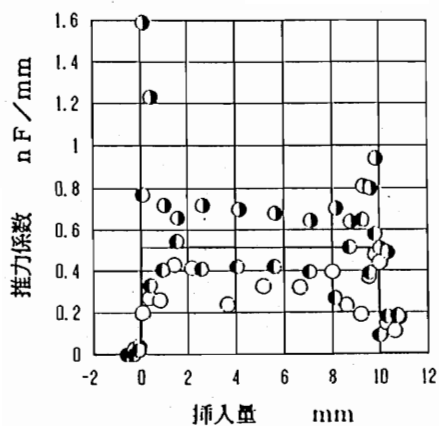
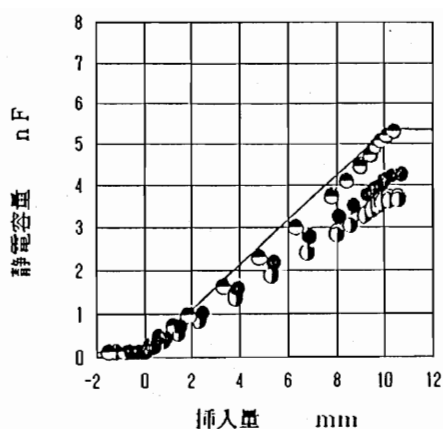
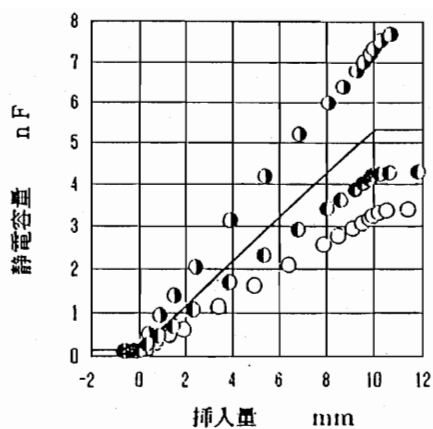


図3・14 空気中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係



- $L_p = 2$ mm B電極は大気開放
- ◐ $L_p = 5$ mm "
- $L_p = 10$ mm "

- $L_p = 2$ mm A電極は大気開放
- ◐ $L_p = 2$ mm A電極は短絡
- ◑ $L_p = 5$ mm A電極は大気開放
- ◒ $L_p = 5$ mm A電極は短絡
- ◓ $L_p = 10$ mm A電極は大気開放
- $L_p = 10$ mm A電極は短絡

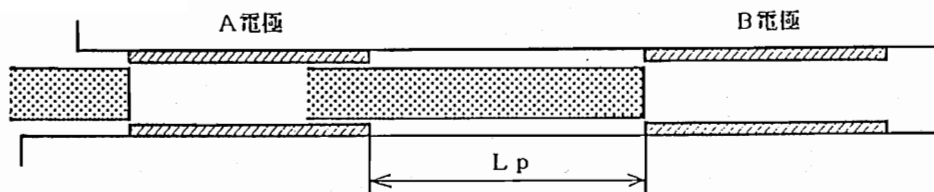
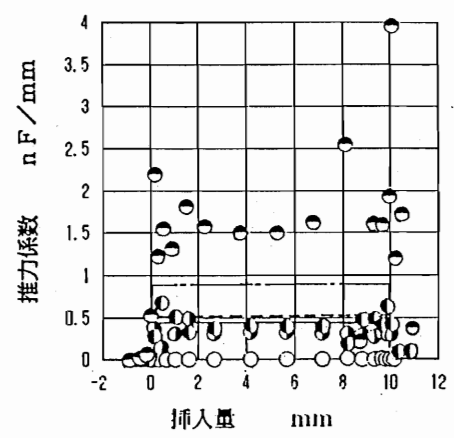
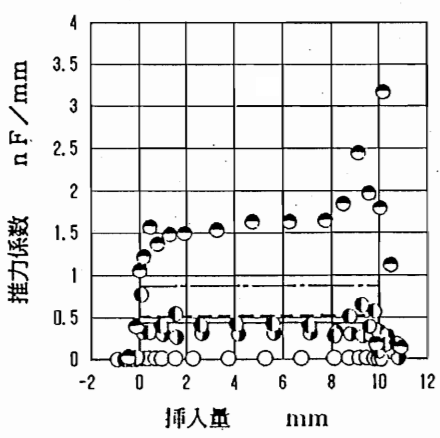
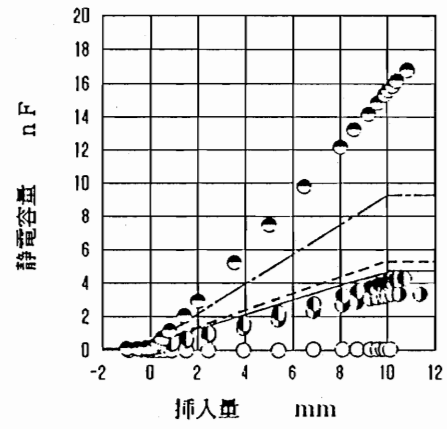
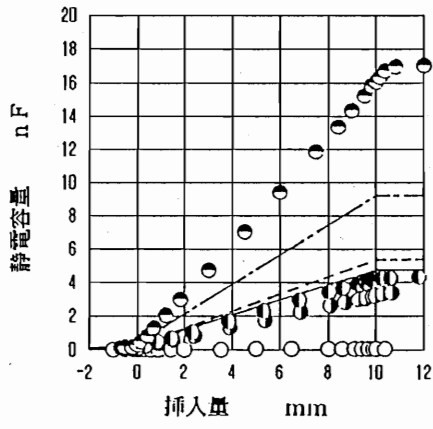


図3・15 純水中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係



- 空気
- ● 炭酸プロピレン
- ● 純水
- · - · ● N-メチルホルムアミド

- 空気
- ● 炭酸プロピレン
- ● 純水
- · - · ● N-メチルホルムアミド

B電極は短絡

A電極は短絡

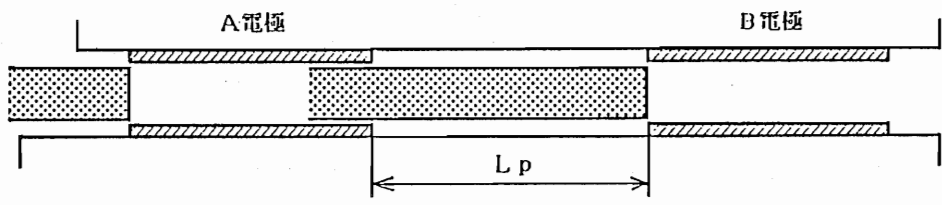
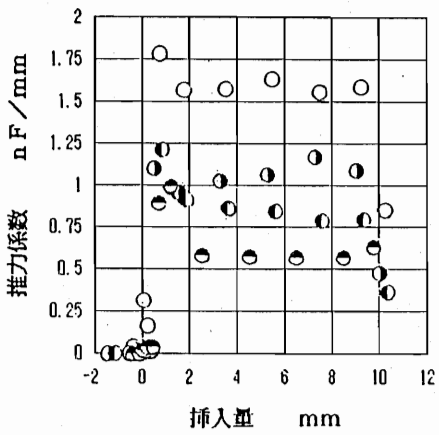
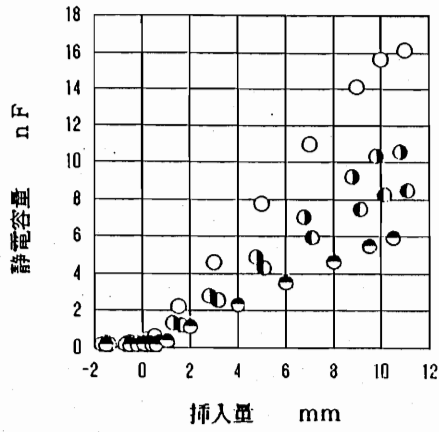


図3・16 ギャップ充填材中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係 (2電極タイプ 電極間隔 $p=10$ [mm])



- 体積抵抗率 $\rho = 5.8 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$
- $\rho = 40 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$
- ⊙ $\rho = 400 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$
- ◐ $\rho = 700 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$

B電極は大気開放

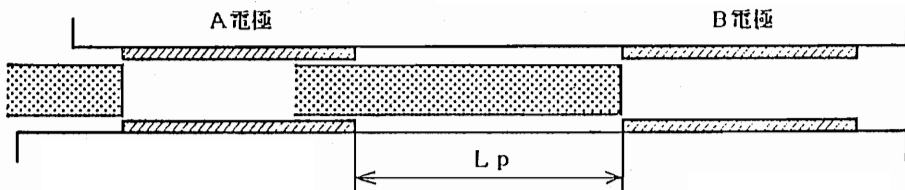


図3・17 純水中におけるスライダの挿入量と静電容量および推力係数との関係 (2電極タイプ 電極間隔 $L_p = 5$ [mm])

表3・6 1電極タイプの空気中における静電容量 (ϵ_{rg} を変化)

ϵ_{rg} の値	推力係数 pF/mm
0.5	21.65
0.6	25.96
0.7	30.28
0.8	34.59
0.9	38.90
1.0	43.20
1.1	47.50
1.2	51.79
1.3	56.09
1.4	60.38
1.5	64.66

表3・7 1電極タイプの空気中における静電容量 (g を変化)

gの値 μm	推力係数 pF/mm
5	86.89
6	72.37
7	61.97
8	54.15
9	48.07
10	43.20
11	39.21
12	35.88
13	33.07
14	30.65
15	28.56

表3・8 2電極タイプの空気中における静電容量 (ϵ_{rg} を変化)

ϵ_{rg} の値	推力係数 pF/mm
0.5	4.33
0.6	5.19
0.7	6.06
0.8	6.92
0.9	7.78
1.0	8.64
1.1	9.50
1.2	10.36
1.3	11.22
1.4	12.08
1.5	12.93

表3・9 2電極タイプの空気中における静電容量 (g を変化)

gの値 μm	推力係数 pF/mm
5	17.38
6	14.47
7	12.39
8	10.83
9	9.61
10	8.64
11	7.84
12	7.18
13	6.61
14	6.13
15	5.71

- ①送り機構が正確ではなかった。
- ②スライダの比誘電率が正確に12000ではなかった。
- ③空気の比誘電率が各測定ごとに変化した。
- ④ギャップが正確に10 [μm]ではなかった。

これらの要因のうち、①の送り機構については最小読み取り0.01 [mm]，移動精度が真直度で0.03 [mm]というXYテーブルを用いておりmmオーダーの移動ではほとんど誤差がでないことよりまず原因とは考えられない。②のスライダの比誘電率に関しては、第2章で述べたように $\epsilon_{r,s} = 12000$ 近辺ではスライダの比誘電率に多少誤差があっても静推力には影響しないということが理論式よりわかっているので誤差に与える影響はほとんど無いと考えられる。

③と④を考える前に1電極タイプの空気中における静電容量の計算値を空気の比誘電率をパラメータにとったものを表3・6に、またギャップをパラメータにとったものを表3・7に示す。さらに2電極タイプについても同じ計算を行ないそれぞれ表3・8，表3・9に示す。空気の比誘電率は1であるがその値がわずかに変化しただけで静電容量がかなり変化してしまうことがわかる。またギャップは10 [μm]であるがやはりわずかに変化しただけで静電容量がかなり変化してしまう。

さて、空気は湿度によって比誘電率が変化するものと考えられる。そこで1電極タイプのステータを用いて実際に湿度を変化させて静電容量を測定したところ湿度38 [%]のとき電極間の静電容量が34.56 [pF]であったが、湿度をほぼ100%とすると電極間の静電容量は最大35.30 [pF]まであがった。静電容量は湿度を変えることによって約2 [%]ほど大きくなった。この結果より、確かに空気は湿度によってその比誘電率が変化するがその変化量はわずかであることがわかった。したがって③の空気の比誘電率の変化はそれほど測定誤差に影響を与えない。

最後に、④のギャップの精度の影響についてであるが、ステータとスライダとのギャップはスライダの厚さのわずかな誤差や電極の組立過程における誤差などによって正確な値がでていないとは考えられない。空気中における2電極タイプの静推力の測定において、電極間隔2 [mm]の測定時に剥がれた電極支持体を接着剤で接着して同じ測定をすると静電容量が極端に小さくなった(3・5・2参照)ことから、ギャップの精度の影響がかなり大きいのではないかと考えられる。

したがって、静電容量の測定誤差はギャップの精度の影響によるものと考えられる。

(2) ギャップ充填材中での測定誤差

図3・15を見ると純水中での結果がステータの違いによってかなり差があることがわかる。これには以下のような原因が考えられる。

- ①電極間隔による差
- ②ギャップの大きさが違う
- ③純水の体積抵抗率や比誘電率が違う

このうち①の電極間隔による差については

- ・図3・14より空気中での結果がA電極では電極間隔に影響なく同じ値になったがB電極では電極間隔によって静電容量が異なっている。
- ・図3・15より純水中での結果がA電極では電極間隔によって静電容量が異なっているがB電極では電極間隔による差が小さくなっている。

ことより空気中と純水中では全く違った傾向を示しており因果関係がみられない。もし②が原因なら電極間隔の違いによる静電容量の大小関係が空気中、純水中を問わず同じであるはずだが結果は異なるためギャップの大きさが主たる原因とは考えられない。

そこで主たる原因として挙げられるのが③の純水の体積抵抗率や比誘電率の違いである。純水を空気中に放置すると、水槽中に染み込んでいた成分が溶け出したり空気中のほこり等が混ざって時間の経過とともに体積抵抗率や比誘電率が変化する。比誘電率の違いはそれだけで静電容量に影響がでる。一方体積抵抗率においては、もしこの値が小さくなった場合に静電容量測定のために交流電圧をかければ、その周波数によっては瞬間的に電極間に電流が流れてしまい、あたかも電極間の電荷が増えたかのように振舞うため、その結果として静電容量が増加する。したがって、体積抵抗率が変化しても測定される静電容量は変化する。体積抵抗率の違いによって静電容量がどれだけ変化するか測定した結果が図3・17である。図より体積抵抗率が小さくなると静電容量および推力係数がかなり大きくなることわかる。

これと同じことが他のギャップ充填材についても言える。

(3) ギャップ充填材中での電極端部での推力係数の飛び跳ね現象について

ギャップ充填材を使用した際の推力係数の結果を見ると、どれを取っても電極端部で推力係数が飛び跳ねていることがわかる。この原因はZテーブルの精度によるものと考えられる。Zテーブルのマイクロメータのヘッドとステージ本体との組立がうまくいかなかったため、カタログどおりの送り精度が得られなかった。このZテーブルはマイクロメータを一回転させるごとに0.5 [mm] だけZステージを移動させる機構になっている。しかしマイクロメータのヘッド部がステージに垂直に立っていなかったため、一回転につき0.5 [mm] の移動量は正確なものの、一回転以下の移動量については0.5 [mm] を回転数に応じて比例配分されていなかった。推力係数は静電容量を実際の移動量ではなくマイクロメータで読んだ移動量で割っているため、細かくスライダを移動させた電極の端部で推力係数が飛び跳ねたものと考えられる。その証拠に飛び跳ねの前後の推力係数はかなり小さな値になっており、さらに0.5 [mm] 以上移動させた際には推力係数の飛び跳ねが見られなかった。

3・6・3 電極端部における端効果の影響

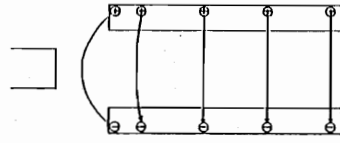
1電極タイプの測定結果(図3・4)をみると、電極の入口部±0.3 [mm] 付近において静電容量が徐々に増加しそれとともに推力係数もなめらかに増加している。また2電極タイプの測定結果(図3・5～図3・7)においても、同じ現象が電極の入口±0.3 [mm] 付近において見られる。これらは端効果の影響と考えられる。なぜなら電極端部は端効果によって電気力線が、前章の図2・20の様になっておりスライダは電界が疎の部分から密の部分に入っていくからである。これを図解したものが図3・18である。

(a) スライダが端効果域に入る前では電極の電荷の数は一定であり推力係数も0のままである。(端効果域前)

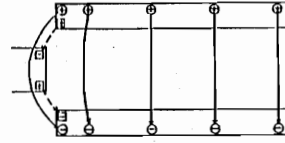
(b) スライダが電極の手前に達すると端効果によって電極の外側に膨らんだ電気力線の影響でスライダに分極が起これ、その結果電極間の静電容量が増え推力係数も増加し始める。この端効果域では電界が疎であるので推力係数の増加はまだわずかである。(端効果域中)

誘電体

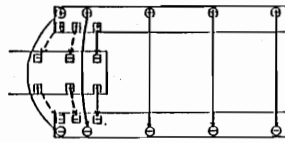
電極



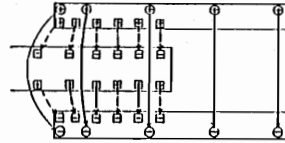
(a) 端効果域前



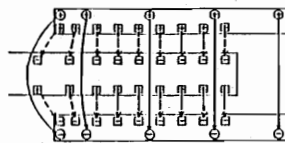
(b) 端効果域中



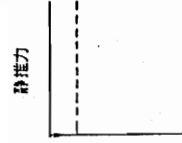
(c) 端効果域直後



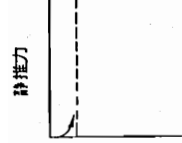
(d) 端効果域後



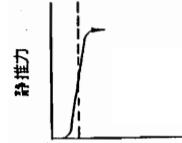
(e) 端効果域後



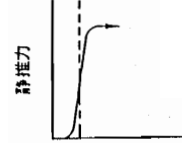
挿入量



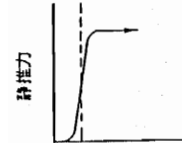
挿入量



挿入量



挿入量



挿入量

- ⊕ 誘電体挿入以前から電極間に存在する正電荷
- ⊖ " " 負電荷
- ⊞ 誘電体の分極によって生じた正電荷
- ⊟ " " 負電荷
- 電荷 ⊕ ⊖ によって生じた電気力線
- > ⊞ ⊟ " "

図3・18 電極間の電位分布と端効果との関係 (電圧一定の場合)

(c) スライダが電極内に完全に入ると電界が密になりスライダでの分極電荷も多くなるので推力係数がぐっと増す。(端効果域直後)

(d) スライダが電極内にさらに入ると電界は一定になるので挿入量に対する分極電荷の増加量も一定になり推力係数は一定になる。(端効果域後)

(e) これ以降はスライダをさらに挿入しても推力係数は一定である。

3・6・4 電極間隔の静推力への影響

電極間隔の静推力への影響をA電極とB電極での測定結果を基に考えてみる。組立精度が電極間隔の違いによってかなり違うので推力比と言うものを用いて測定結果を評価し直したものが図3・19と図3・20である。推力比とは図中にも示されているように測定外の電極を大気開放したときに得られた推力係数で測定外の電極を短絡したときに得られた推力係数を割った値である。図よりA電極においてもB電極においても推力比は電極間隔に関わらず一定である。したがって互いに十分離れている電極の電極間隔の静推力への影響はないものと考えられる。

3・6・5 ギャップ充填材の体積抵抗率の静推力への影響

図3・19を見るとA電極の推力比は挿入量に関わらず1で一定であるが、空気中ではB電極の推力比はB電極にスライダを挿入した瞬間に小さくなり徐々に1に近づくことがわかる。これはB電極測定時にA電極大気開放時は何ともなかったB電極の電荷がA電極を短絡するとスライダの表面を通じてA電極に逃げるためと考えられる。

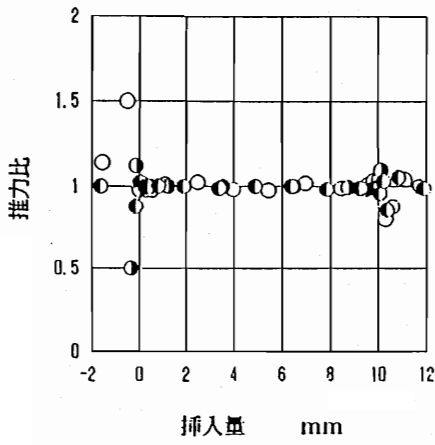
ところが図3・20の純水中の結果では同じ様なことが起こっていない。この原因は空気と純水の体積抵抗率の違いに起因すると考えられる。空気の体積抵抗率は $\rho = 1.0^{15}$ [k $\Omega \cdot$ cm] に対して、純水の体積抵抗率は $\rho = 1.0^3$ [k $\Omega \cdot$ cm] とかなり小さいため、B電極の電荷はA電極を通さなくても漏れることになる。したがってA電極を短絡することによって、外に漏れる電荷の量は純水中に漏れる電荷の量に比べて少ないために推力比はA電極の状態に関わらず変わらないのである。

次に3種類のギャップ充填材について挿入量とB電極の推力比との関係を図3・21に示す。図より体積抵抗率が小さいN-メチルホルムアミドは挿入量に関わらず推力比は1で一定であるが、体積抵抗率がほとんど等しい炭酸プロピレンと純水は空気中ほどではないが挿入直後で推力比が小さくなっており、体積抵抗率が大きいほど他電極を短絡すると推力係数が小さくなるのがわかる。

3・6・6 電極のアスペクト比と端効果

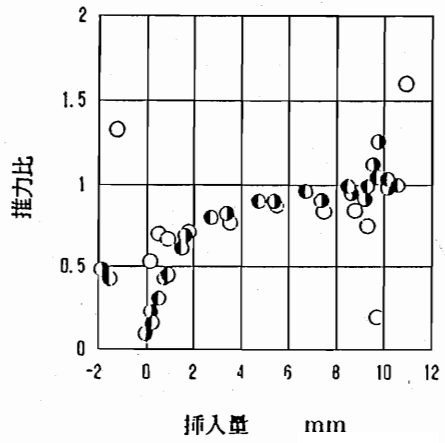
静電アクチュエータを集積化して素子全体の推力を向上させる一手段に、基本素子の電極長さLを小さくする方法があることが第2章でわかった。一方、静推力実験の結果よりコンデンサの端効果の影響で電極端部の静推力がなめらかに増加することもわかった。そこでこの端効果と電極のアスペクト比との関係について考えた。

1電極タイプ (AR=0.028), 2電極タイプのA電極 (AR=0.1), のそれぞれについて、電極端部でのスライダの挿入量に対する推力係数の変化の様子を示したものが図3・22である。図中補正推力係数とは各電極とも電極の幅が違うため、挿入方向から電極長さL=5 [mm], 電極の幅W=2.0 [mm]の部分だけを抽出した推力係数のことである。図より各ステータのギャップが異なるため推力係数の値が異なる上に、原点がずれてはいるものの各ステータともに、端効果はスライダが電極の端部から±0.3



- $L_p = 2 \text{ mm}$
- ◐ $L_p = 5 \text{ mm}$
- $L_p = 10 \text{ mm}$

推力比 = B 電極短絡時の推力係数
 / B 電極大気開放時の推力係数



- $L_p = 2 \text{ mm}$
- ◐ $L_p = 5 \text{ mm}$
- $L_p = 10 \text{ mm}$

推力比 = A 電極短絡時の推力係数
 / A 電極大気開放時の推力係数

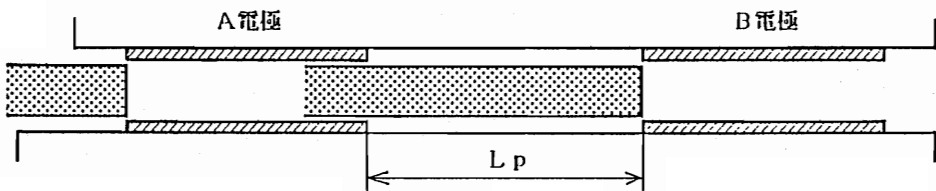
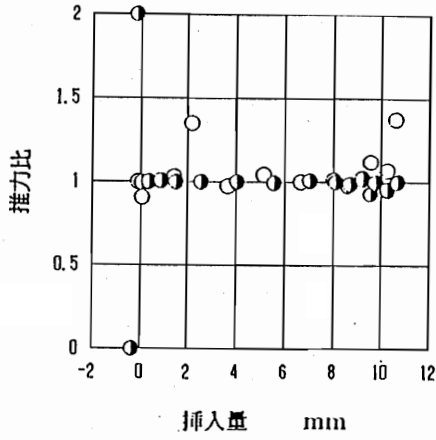
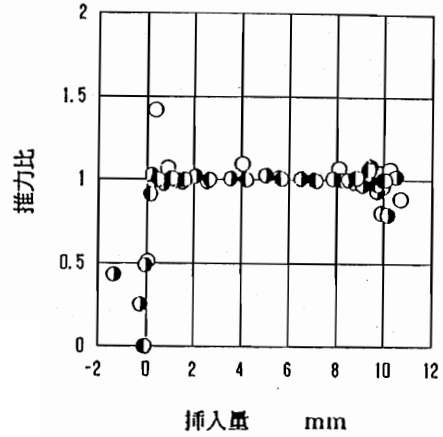


図3・19 空気中におけるスライダ挿入量と推力比



- $L_p = 2 \text{ mm}$
- $L_p = 10 \text{ mm}$

推力比 = B 電極短絡時の推力係数
 / B 電極大気開放時の推力係数



- $L_p = 2 \text{ mm}$
- ◐ $L_p = 5 \text{ mm}$
- $L_p = 10 \text{ mm}$

推力比 = A 電極短絡時の推力係数
 / A 電極大気開放時の推力係数

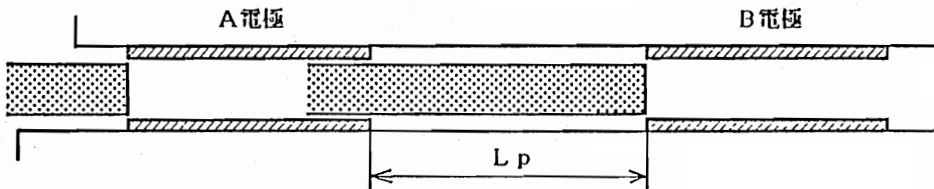
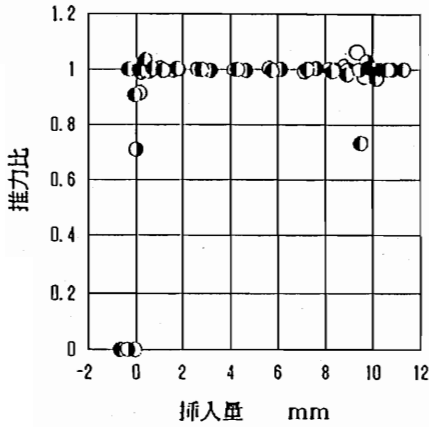
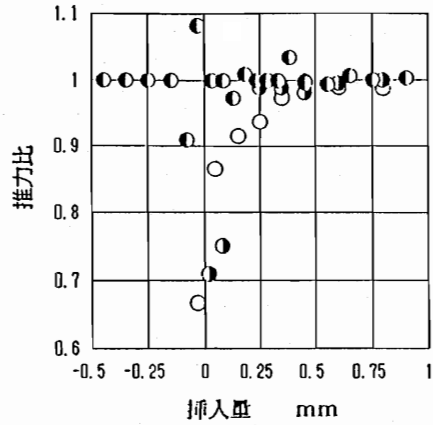


図3・20 純水中におけるスライダ挿入量と推力比



(a) 全体図



(b) 部分拡大図

- 純水 $\rho = 1000 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$
- 炭酸プロピレン $\rho = 750 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$
- ◐ N-メチルホルムアミド $\rho = 2.4 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$

推力比 = A電極短絡時の推力係数
 / A電極大気開放時の推力係数

図3・21 ギャップ充填材中におけるスライダ挿入量と推力比
 (2電極タイプ 電極間隔 $p=10$ [mm])

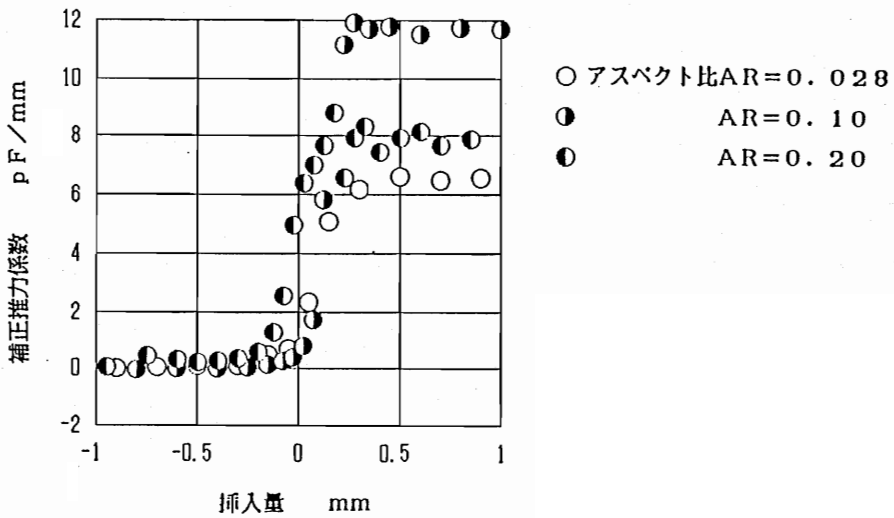


図3・22 電極のアスペクト比が異なる場合の挿入量と推力係数の関係

[mm]にあるとき生じている。したがって電極間距離 D が等しければ、端効果域の範囲も等しいと考えられる。

素子の集積化を図るために基本素子の電極長さをどんどん小さくしていくと、電極の全面積に対する電極両端に生じる端効果域の面積が大きな比率を占めるようになり、やがて電極全域が端効果域に包まれることが予想される。この場合端効果の影響によって電極間内外のポテンシャル差（電界密度の差）が小さくなり、所定の推力が出せなくなる。前章の $2 \cdot 6 \cdot 2$ からわかるように、アスペクト比（縦横比＝電極間距離 D ／電極間隔 L_p ）を大きくするとポテンシャル差が小さくなるが電極間隔が小さくなる。アスペクト比を小さくするとポテンシャル差が大きくなるが、電極間隔が大きくなり集積化に不利になる。このアスペクト比の境界値はシミュレーション結果より $AR=0.5$ と求められた。図 $3 \cdot 2 \cdot 2$ よりこの境界値を求めると $AR \approx 1.7$ となる。この $AR=1.7$ は、これ以上アスペクト比が大きくなると電極の全域で端効果が生じるという値である。この結果を前章の図 $2 \cdot 1 \cdot 9$ のアスペクト比を変化させたときの電位分布のシミュレーション結果と照らし合わせてみると、シミュレーションでは $AR=1$ 以上になると電極間内でも等電位線が曲がりくねっているため、電極間内全域で端効果が生じてしまう。したがって、シミュレーション結果と静推力実験の結果は、ほとんど一致していると言える。すなわち基本素子を集積化する際アスペクト比は 0.5 より小さくすることが望ましいという理論が実証されたわけである。

アスペクト比を 0.5 以下にした場合には、電極間内の少なくとも一部は端効果の影響を全く受けないので、リップルの少ない安定した推力を得ることができる。また、実験結果と電位分布のシミュレーション結果がほぼ一致したことにより、電極での端効果の様子はシミュレーションによって十分な予測が立つことがわかった。

3・7 結言

本実験では単純な構造のステータとセラミクスライドを用い、電極へのスライドの挿入量に対する静電容量を測定し、その変化量から推力係数を計算で求め、静推力を知る指標として特性を調べた。この実験を通じて以下のような結果が得られた。

- ① 静推力は理論どおり、スライドの挿入量に関わらず一定であった。
- ② 推力の理論式の妥当性が確認できた。
- ③ 端効果が静推力に影響を与えることがわかった。
- ④ ギャップ充填材の比誘電率を変えることによって理論どおり静推力の向上が図れた。
- ⑤ 電極間隔の差は静推力に現われなかった。
- ⑥ ギャップ充填材の体積抵抗率が大きいほど、他電極を短絡するとスライドの表面を通じてそこから電荷が逃げるのがわかった。
- ⑦ 静推力は理論どおり、基本素子を集積することによって増加することがわかった。
- ⑧ 基本素子を集積する際、電極間隔をアスペクト比 $AR=0.5$ 以下となるようにすれば、電極間内外のポテンシャル差が大きくなるので、端効果の影響が少なくなるという等電位分布のシミュレーション結果が実験結果と一致した。

第4章 結論と今後の展望

4・1 本研究の成果

本研究では、静電力で駆動する微小集積形静電リニアアクチュエータの開発を目指した。そこでその基礎を固めるために、静電リニアアクチュエータの基本素子の駆動理論を導出し、拡大基本素子を用いてその静推力を実験で確かめ、その結果より、実機機構の確立と発生推力の増強法について検討した。本章ではこれを総括し、本論文を締めくくることにした。

4・1・1 静電アクチュエータの駆動理論

静電アクチュエータの推力 F_h は次式で表わされる。

$$F_h = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r_0} (\epsilon_{r_s} - \epsilon_{r_0}) W d}{2 (2g + d) (2g \epsilon_{r_s} + d \epsilon_{r_0})} \cdot V^2$$

ただし ϵ_0 は、真空の誘電率

この理論式から静電アクチュエータの基本素子において次のようなことがわかった。

- (1) 対向する電極に電圧を印加すると誘電体を対向する電極間に引き込む力が働くことを利用してスライダの駆動ができる。この引き込む力が静電アクチュエータの推力となる。
- (2) その発生推力は F_h で表わされ、誘電体の挿入量に関わらず一定である。
- (3) 発生推力の理論式より基本的に以下のようにすればよいことが分かった。

- ① スライダの比誘電率 ϵ_{r_s} ・ ・ ・ ・ ・ 大きくする
- ② ギャップ g ・ ・ ・ ・ ・ 小さくする
- ③ 電極およびスライダの幅 W ・ ・ ・ ・ ・ 大きくする
- ④ 印加電圧 V ・ ・ ・ ・ ・ 大きくする
- ⑤ スライダ厚 d ・ ・ ・ ・ ・ 最適値にする
- ⑥ ギャップ充填材の比誘電率 ϵ_{r_0} ・ ・ ・ 最適値にする

4・1・2 静推力実験

静電アクチュエータの拡大素子を用いてスライダの電極への挿入量に対する静電容量の変化量（推力係数）を測定したところ以下のことがわかった。

- (1) 静推力は理論どおり、スライダの挿入量に関わらず一定である。
- (2) ギャップ充填材の比誘電率を変えることによって理論どおり静推力の向上が図れる。
- (3) 推力の理論式の妥当である。
- (4) 電極間隔の差は静推力には現われない。
- (5) ギャップ充填材の体積抵抗率が大きいほど、他電極を短絡するとスライダの表面を通してそこから電荷が逃げる比率が高くなる。
- (6) 端効果が静推力に影響を与え、静推力は端効果によって小さくなる。

4・2 今後の展望

静電アクチュエータは現在のマイクロシニング技術を以てすれば、基本素子の長さを0.5 [μm]程度まで小さくすることができるから、十分実用に供する事のできる出力が得られるとともに、精密な動きをさせることも可能となる。この静電アクチュエータによって微小な機械を駆動できるようになると、細胞操作、OA機器、精密光学機器、など様々な分野で応用が期待でき、その波及効果はきわめて大きなものとなる。

しかし、微小化に際して、(1)増大する摩擦力を低減する、(2)サブミクロンオーダーのギャップを維持する、などの大きな問題が残されており、今後よりいっそうの研究が必要となる。

謝辞

実験装置の設計、製作から実験場所の手配に至るまで懇切丁寧にお世話してくださった桜井文夫氏、奥山九五氏、三上亘氏、長竹和夫氏、大輪武司氏、荻島毅一郎氏、栗田康夫氏に厚くお礼申し上げます。

また実験を手伝ってくれた宮崎俊幸君、倉田浩君、安田武司君、小笠原幹君、工藤裕一君に心から感謝の意を表します。

引用文献

- 1) J. M. マレー, 筋タンパク質の協同作用, サイエンス, 4 62-71, 日経サイエンス社 1974
- 2) 丸山, 筋研究の新展開, 現代化学, 188 10-11, 1986
- 3) 柳田, 筋収縮の仕組み, 現代化学, 188 18-22, 1986
- 4) 若林, アクチンフィラメントの構造, 現代化学, 188 23-26, 1986
- 5) 矢野, 筋収縮機構の新しい展開, 日本物理学会, 41-7, 560-563, 1986
- 6) 矢野, バイオモーター, エルエスティ学会誌, 1-2, 75-80, 1986
- 7) 矢野, 筋収縮の仕組み, 現代化学, 188 12-17, 1986
- 8) 静電気学会, 静電気ハンドブック, 巻末付録, オーム社 1981
- 9) J. B. エンジェル, シリコン基板に組み込んだマイクロセンサー, サイエンス, 13-6, 18-31 1983