
生物の筋肉をモデルとした集積型
微小静電アクチュエータの開発

(02452133)

平成4年度科学研究費補助金（一般研究B）研究成果報告書

平成5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 Integrated
Electrostatic Linear Actuator
as Biomimicking Skeletal Muscle

No. 02452133

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

in 1992

March, 1993

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

はしがき

本研究では筋収縮の原理を応用し、無機質からなるバイオアクチュエータとしての集積型微小静電リニアアクチュエータを、現在の微細加工技術を用いて開発し、人工筋肉を実現することを目的とした。

研究の結果以下のことが分かった。

- 1) アクチュエータを積層化する際に必要なステータ上の両面に電極を配置するパターンの違いによる電極内外のポテンシャル差に優位の違いはないことが分かった。またステータの厚みによる違いも認められなかった。
- 2) 電極を多数個集積した際の電極の内外に蓄積されたエネルギーから有効に利用できるエネルギーを理論と実験から求め、これを基準に集積限界を評価した。その結果ステータの電極のアスペクト比は0.8で最適であることが確認された。
- 3) アクチュエータの吸引力の駆動周波数特性を求めたところ、駆動に適した周波数領域は1~10kHzの範囲であることが分かった。
- 4) 理論的検討を基に、一層につき20個の基本素子を集積化したものを試作し、10kHzで駆動して電圧の出力に及ぼす影響を調べたところ、吸引力は理論通り電圧のほぼ2乗に比例することが確認された。
- 5) この集積化したものを5層並列に組み合わせ、合計100個の基本素子を有する、外形が幅44×長さ44×厚さ8.82mmの多層集積化モデルを試作した。100V、10kHzの交流電圧を印加したところ、31.85mNの吸引力を発生した。力密度としては1.865kN/m³以上の値が得られ3次元集積化の効果を確認することができた。
- 6) 有効に力を発生する基本素子ができるだけ多くなるような駆動法を考案し、1ステップ2.5mm(電極長さの1/2)の連続駆動を行ったところこの方法が有効であることが確認できた。

以上の点から、この筋肉をモデルとした集積型微小静電アクチュエータの実現の可能性が高いことを確認した

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

| | |
|-------|---------|
| 平成2年度 | 2,000千円 |
| 平成3年度 | 1,400千円 |
| 平成4年度 | 1,200千円 |
| 計 | 4,600千円 |

研究論文

- 1) 壁井信之：「マイクロマシニング」人工筋肉はマイクロマシニングで製作できるか。医科器械学 第61巻9号 pp396-399 1991

- 2) 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: 生物の筋肉をモデルとした静電リニアアクチュエータの理論的検討 日本機械学会論文集 (C編) 第57巻538号 pp134-139 1991
- 3) Kabei N., Miyazaki T., Kurata H., Ogasawara M., Murayama T., Nagatake K. and Tsutiya K. : Theoretical analysis of an electrostatic linear actuator developed as a biomimicking skeletal muscle. JSME International Journal Series 3 Vol.35, No.3 pp400-405 1992

研究発表

- 1) 壁井信之, 小笠原幹, 村山知寛, 長竹和夫, 土屋喜一: 生体の筋肉をモデルとした静電リニアアクチュエータ - 交流駆動による静推力試験 -. 日本機械学会第3回バイオエンジニアリング部門学術講演会 講演論文集 (No.910-44) pp60-62 7月25日 東京 1991
- 2) 壁井信之: 「マイクロマシニング」 人工筋肉はマイクロマシニングで製作できるか. 第66回日本医科器械学会 5月23日 東京 1991
- 3) 壁井信之, 伴暁, 村山知寛, 長竹和夫, 土屋喜一: 生体の筋肉をモデルとした静電リニアアクチュエータ - 二次限方向への集積化の検討 -. 日本機械学会第4回バイオエンジニアリング部門学術講演会 講演論文集 (No.920-64) pp7-9 7月23日 奈良 1992

著書

- 1) 壁井信之, 土屋喜一: 第4章 第1節 新しいタイプの人工臓器. 人工臓器 '92. 阿岸鉄三編 pp273-277 中山書店 東京 1992
- 2) 壁井信之: 第3編 第4章 第8節 液体中で動く静電アクチュエータ. マイクロマシン技術による製品小型化・知能化事典 同編集委員会編 pp804-806 (株) 産業調査会・事典出版センター 東京 1992

研究成果

記号表(その1)

| 記号 | 名称 | 単位 |
|-----------------------------------|----------------|----------------|
| d | スライダの厚さ | m |
| D e | 電極の厚さ | m |
| D | 電極間の距離 | m |
| g | ギャップ | m |
| l | スライダの長さ | m |
| L | 電極の長さ | m |
| P | 電極の間隔 | m |
| s | 電極支持体の長さ | m |
| L _p | 電極のピッチ | m |
| S | 電極の面積 | m ² |
| w | スライダの幅 | m |
| W | 電極の幅 | m |
| W _s | 電極支持体の幅 | m |
| X | 挿入量 | m |
| ε ₀ | 真空の誘電率 | F / m |
| ε _{rs} | スライダの比誘電率 | |
| ε _{rg} | ギャップ充填剤の比誘電率 | |
| V | 印加電圧 | V |
| C (X) | 挿入量 X における静電容量 | F |
| F _s | 理論推力 | N |
| F _e | 実行推力 | N |
| n | 素子の集積個数 | |
| d _c | 溝入りスライダの溝深さ | m |
| A R | アスペクト比 (D / L) | |
| ω | 振動数 | rad / s |
| f | 周波数 | H ^z |
| C _w | スライダ未挿入空間の静電容量 | F |
| C _g | ギャップの静電容量 | F |
| C _s | スライダの静電容量 | F |
| C ₁ , C ₂ | 合成静電容量 | F |
| C | 静電容量 | F |
| ε _{rs} , ε _{rc} | 合成比誘電率 | |
| M | スライダの溝の長さ | m |
| L _s | スライダ凸部長さ | m |
| F _v | 電極板間吸引力 | N |
| R _{max} | 表面粗さの最大高さ | m m |
| E _i | 電極間内のエネルギー | J |
| E _o | 電極間内のエネルギー | J |

記 号 表 (その 2)

| 記 号 | 名 称 | 単 位 |
|-----------|-------------------|---------------|
| δ | 損 失 角 | r a d |
| ρ | 電 気 二 重 層 電 荷 密 度 | C / m^2 |
| ϕ | 電 位 分 布 | V |
| δ' | デ バ イ 長 | m |
| τ | 緩 和 時 間 | S |
| Γ | 拡 散 係 数 | |
| m | ス ラ イ イ ダ 質 量 | k g |
| α | ス ラ イ ダ の 加 速 度 | $k g m / S^2$ |
| ν | ス ラ イ ダ 速 度 | m / S^2 |
| f_k | 推 力 係 数 | |
| D | 外 乱 入 力 | |
| U | 外 乱 伝 達 関 数 | |
| r, R | 電 圧 の 2 乗 | V^2 |

目 次

摘 要

記号表

第 1 章 序 論

| | | |
|-----|----------------------|----|
| 1・1 | はじめに | 1 |
| 1・2 | 技術の中におけるアクチュエータの役割 | 1 |
| 1・3 | 静電リニアアクチュエータに求められるもの | 2 |
| 1・4 | 従来の研究 | 4 |
| 1・5 | 本研究の流れ | 7 |
| 1・6 | 研究目的 | 9 |
| 1・7 | 研究の進め方 | 10 |

第 2 章 設 計

| | | |
|-------|------------------|----|
| 2・1 | 緒言 | 12 |
| 2・2 | 基本構造 | 12 |
| 2・3 | 基本素子の推力増強に関わる因子 | 14 |
| 2・4 | 3次元レベルでの集積化方法の検討 | 16 |
| 2・4・1 | 空間的な電極配置パターン | 16 |
| 2・4・2 | ステータの厚み | 20 |
| 2・5 | スライダ | 23 |
| 2・6 | 素子の寸法, 精度 | 25 |
| 2・6・1 | 極板間吸引力に対する考慮 | 25 |
| 2・6・2 | 表面の精度に関して | 27 |
| 2・7 | 小括 | 29 |

第 3 章 推力係数測定試験

| | | |
|-------|-----------------|-----|
| 3・1 | 緒言 | 3 1 |
| 3・2 | 推力係数の概念 | 3 2 |
| 3・3 | 推力係数の理論値と実験値 | 3 2 |
| 3・4 | 実験装置 | 3 5 |
| 3・4・1 | 被測定部 | 3 6 |
| 3・4・2 | 測定部 | 3 8 |
| 3・4・3 | 位置調整機構 | 3 9 |
| 3・5 | 実験方法 | 3 9 |
| 3・6 | 実験結果 | 4 1 |
| 3・7 | データ処理 | 4 3 |
| 3・8 | 3次元レベルの最適アスペクト比 | 4 5 |
| 3・9 | 小括 | 4 6 |

第 4 章 推力測定試験

| | | |
|-------|--------------|-----|
| 4・1 | 緒言 | 4 7 |
| 4・2 | 実験装置 | 4 7 |
| 4・2・1 | 電源部 | 4 7 |
| 4・2・2 | 被測定部 | 4 9 |
| 4・2・3 | 測定部 | 5 1 |
| 4・2・4 | 位置調整機構 | 5 1 |
| 4・3 | 電圧特性確認試験 | 5 2 |
| 4・3・1 | 実験方法 | 5 2 |
| 4・3・2 | 電圧特性試験実験結果 | 5 4 |
| 4・4 | 積層化モデル推力測定試験 | 5 5 |
| 4・4・2 | 積層化モデル実験結果 | 5 5 |
| 4・5 | 考察 | 5 6 |
| 4・5・1 | 基本素子の等価モデル | 5 6 |

| | | |
|-------------|------------------|----|
| 4・5・2 | 理論値と実験値の比較 | 59 |
| 4・6 | 小括 | 62 |
| 第5章 連続駆動 | | |
| 5・1 | 緒言 | 63 |
| 5・2 | 連続駆動をするための電極配置 | 63 |
| 5・3 | 連続駆動モデル | 65 |
| 5・4 | 連続駆動動作確認実験 | 70 |
| 5・4・1 | 実験装置 | 70 |
| 5・4・2 | 実験結果 | 71 |
| 5・5 | 小括 | 72 |
| 第6章 駆動方式の検討 | | |
| 6・1 | 緒言 | 74 |
| 6・2 | 各基本素子からの配線の削減方法 | 75 |
| 6・3 | モデル式 | 77 |
| 6・3・1 | モデル式の応用例 | 78 |
| 6・4 | 力一定駆動 | 79 |
| 6・4・1 | 推力係数の取扱いについて | 79 |
| 6・4・2 | モデル式を用いたスライダの変位量 | 80 |
| 6・4・3 | 出力を変位量としたときの伝達関数 | 81 |
| 6・4・4 | 負荷を考慮した場合の力一定駆動 | 82 |
| 6・5 | 伝達関数 | 83 |
| 6・6 | 小括 | 92 |
| 第7章 結論 | | |
| 7・1 | 今年度の研究成果 | 93 |

| | | |
|-------|-----------------|-----|
| 7・1・1 | 素子の形状について | 9 3 |
| 7・1・2 | 3次元レベルの最適アスペクト比 | 9 3 |
| 7・1・3 | 多層集積化モデルの静推力 | 9 4 |
| 7・1・4 | 連続駆動動作確認実験 | 9 5 |
| 7・2 | 今後の課題と展望 | 9 5 |
| 7・2・1 | 当面の課題 | 9 6 |
| 7・2・2 | 人工筋肉へのアプローチ | 9 6 |

引用文献

参考文献

付録

あとがき

第 1 章

序 論

1・1 はじめに

ここでは、最近の技術におけるアクチュエータの役割、静電アクチュエータの開発状況、本研究の流れについて触れた後、本年度の研究目的、研究の進め方を述べる。

1・2 技術の中におけるアクチュエータの役割

日本のエネルギー源の約80%は石油に依存しており、その8割以上が政情の不安定な中東諸国からの輸入に頼っている。日本経済は極めて不安定なエネルギー基盤の上に成り立っていることは否定できない。その不安定な基盤上にある日本経済も、高度な技術力によって国際的な地位を築いているといっても過言ではない。とりわけ小形、精密機械等の評価は高い位置にある。

我々が日常使用する工業製品は、高度な技術がいたるところに盛り込まれている。最近では製品の高度な機能、性能向上の他に、小形化、携帯性、デザインの向上、環境問題への適合性、省エネルギー化、低騒音などが求められ、各分野からのアプローチは途絶えることがない。中でもLSI等の急速な発達により、機械における情報処理や制御分野は、近年格段の進歩を遂げている。それに伴い、機械システムの頭脳にあたる部分はどんどん小形化しており、留まるところを知らない。

しかし人間の手足に相当する駆動機構は原理的に大きな変化は見られず、コンピュータの進歩に伴い、高精度化、小形化、高効率化が僅かに推し進められているといった段階である。

産業界に限らず近年の技術研究の動向を見ても、情報化、自動化が核となり進歩しているが、前者は電子技術の急速な進歩に伴い、演算装置を核にしたシステムを広く普及させ、技術や産業の形態を大きく変えつつある¹⁾。これに対し、後者の出力部分を担うアクチュエータの開発は大幅に遅れ、性能向上の障害になっているのが現状である。アクチュエータは自動化の核になるものであり、非常に広い分野でその進歩が望まれている。

1・3 静電リニアアクチュエータに求められるもの

アクチュエータとは、電気や流体などのエネルギーを機械的な動きや力に変換するものと言えるが、その動力源のエネルギー形態により多種に分類できる。図1・1にアクチュエータの分類を示す²⁾。

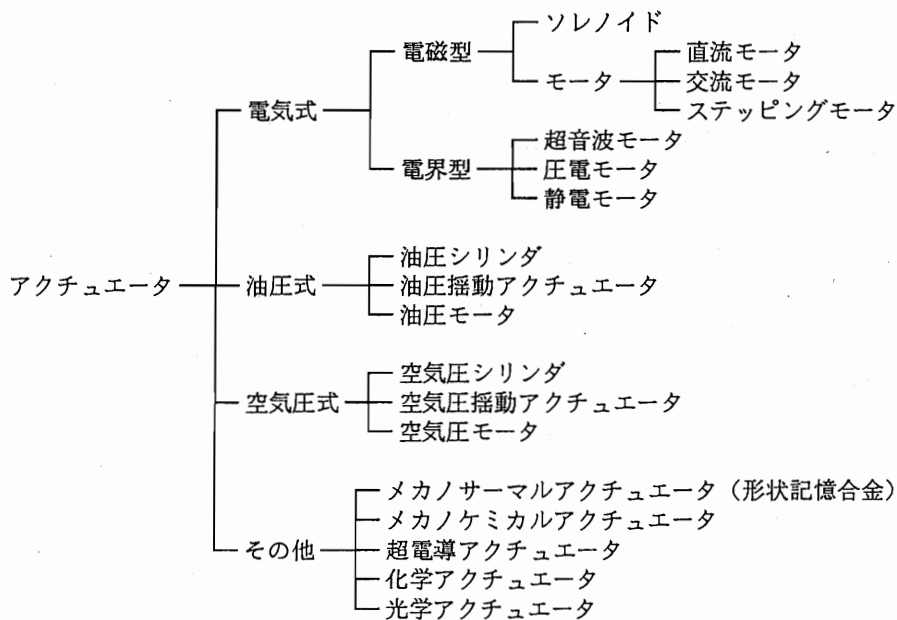


図 1・1 アクチュエータの分類

高出力、高速が要求される場合は油圧式が用いられるが、通常のアクチュエータとしては電気式がよく用いられる。電気式の主な特徴として以下のものが挙げられる³⁾。

- ・ 付帯設備を含めた大きさや重量は非常に小さく、広範囲のサイズに対応できる
- ・ ランニングコストが小さい
- ・ 一般的な安全性が高い
- ・ 周辺機器が揃っているため保全性が良い
- ・ 一般産業用機械、小形低出力制御機械、高精度機械等に適する

中でも、静電リニアモータに期待されるメリットは、

- ・ 微小化に有利である
- ・ 集積化に適している
- ・ 動力トランスフォーマーなしで推力を直接利用できる

などが挙げられるが、微小集積化することによる二次的なメリットとして、

- ・ 単位体積当たりの表面積が大きくなり、熱伝導面で有利になる（冷却効果が高い）
- ・ 力密度（単位体積当たりの発生推力）が高くなる

などが有り、静電リニアアクチュエータに対する期待は大きい。

1・4 従来の研究

静電アクチュエータは電磁力を利用したアクチュエータよりも以前に開発が試みられた。しかし電磁形の発達により急速に衰退し、それ以後も実用レベルに達した静電アクチュエータはなく、研究報告が散見されるに留まっているのが実状であった。しかし、最近のマイクロマシン等の微細加工技術の進展に伴って、静電力を利用したアクチュエータの開発が精力的に進められるようになってきた。但し、集積化が困難なため、出力は極めて小さな値でしかなく、マイクロメートルの大きさの対象物を操作するのがやっとといった段階である。実用レベルの出力を得るにはアクチュエータの集積化が鍵となっている。

現在実行推力を測定できた静電モータはまだ数少なく、理論的検討と動作確認が主な研究となっている。実際に発生推力を測定した例として、図1・2に東京大学生産技術研究所で開発された、フィルム形静電アクチュエータの動作原理を示す⁴⁾。図に示すように絶縁体中に電極を埋め込んだステータと、絶縁体と高抵抗体のフィルム状スライダからなる。スライダはステータの上に接地した状態で置く。

(1)のように電極に電圧を印加すると、平行状態になるまで抵抗体内に電流が流れ、抵抗体と絶縁体の境界に電荷が誘導される。この電荷は、(2)の中に波線で示すような境界面に対する電荷の鏡像の位置に置いた仮想的な電荷で置き換えることができる。この充電操作の後に印加電圧を(3)のように切り替えると、電極内の電荷は瞬時に移動するが、抵抗体に誘導された鏡像電荷は、抵抗値が高いためすぐには移動できない。このときの電極上の電荷の符号は、アクチュエータ駆動回路を適当に設計することによって、(3)のようになる。そうすると、抵抗体の鏡像電荷とその下の電極の電荷は同符号になるため、スライダを浮上させる方向の反発力が発生し、もう1つの

第3の電極の電荷により、横方向の駆動力が発生する。実際には空気の抵抗により、スライダが浮上するには至らないが、反発力の効果により、摩擦は減少しているものと考えられる。最終的にスライダは、(4)のように1ピッチ移動する。このように充電と移動の操作を交互に繰り返すことにより、任意のステップ数を動かすことができる。

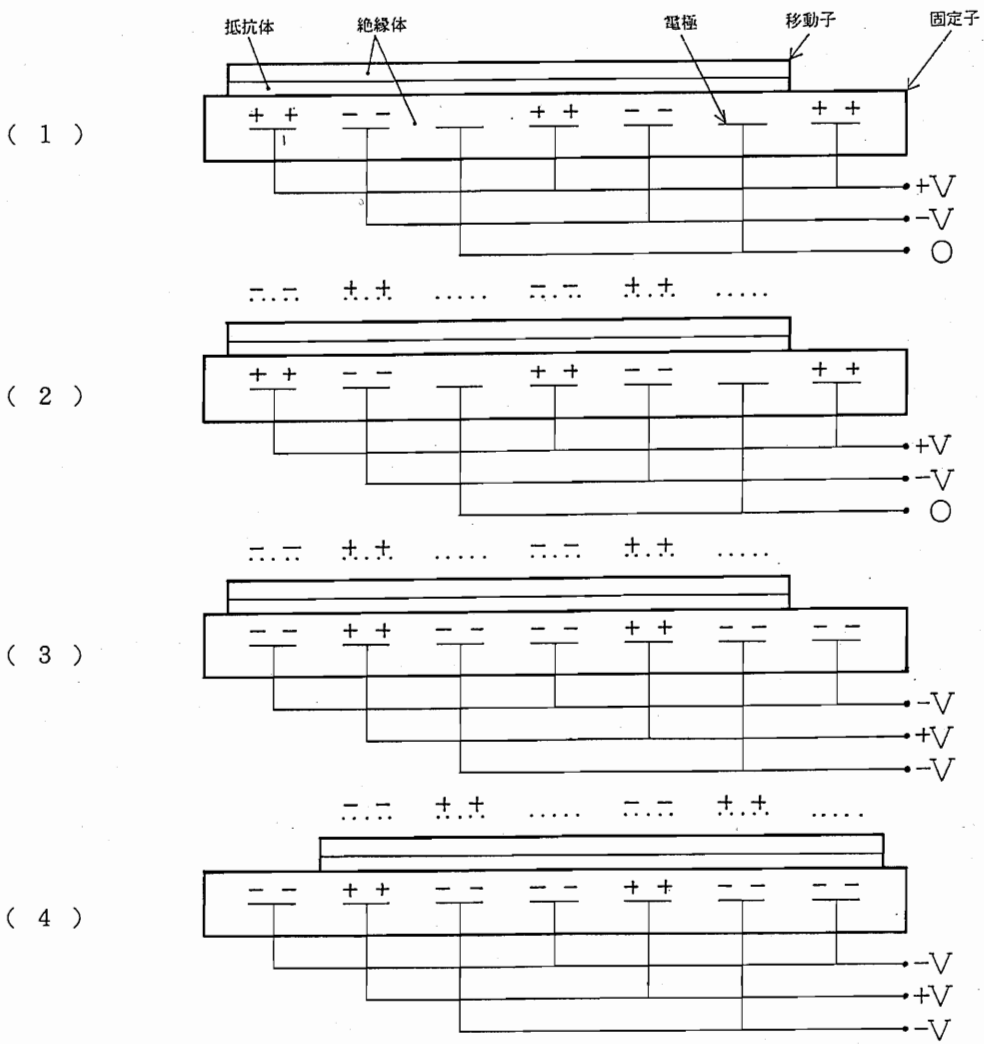


図 1・2 フィルム形静電アクチュエータの動作原理

この駆動原理を用いたモデルの代表データを表 1・1 に示す。このモデルは 0.1 [mm] ピッチの電極を、フレキシブルプリント基盤の製造技術を用いて製作されている。銅箔を接着したポリイミドフィルムにエッチングすることにより、長さ 50 [mm]、ピッチ 0.1 [mm] の電極を 1000 本形成している。表から分かるように、電極ピッチが小さくなる程駆動電圧を低くでき、発生推力も大幅に増加している。電極ピッチを小さくすることにより、更に力密度の向上が期待できる。

更に積層化の基礎実験も行われており、移動子、固定子のそれぞれを 10 対積層化したモデルでは、1 対モデルのほぼ 10 倍の力を発生することが確認されている。しかし、最も力密度の高い 0.1 [mm] の電極ピッチを有するモデルでも、電圧を 500 [V] も印加しているにもかかわらず、体積力密度は 40,000 [N/m³] と小さな値である。また、図 1・1 で示した状態 (1) から状態 (2) に移るまでの時間に、高抵抗体内を電流が流れて電荷をチャージしなければならないため、駆動速度には限界がある。

表 1・1 静電フィルムアクチュエータの基礎データ

| 電極ピッチ [mm] | 1.27 | 0.42 | 0.1 |
|---------------------------|---------------|---------------|----------------|
| 電極スペース [mm] (対ピッチ比) | 0.63 (50%) | 0.21 (50%) | 0.02 (20%) |
| 電極-抵抗対距離 [mm] (対ピッチ比) | 0.31 (24%) | 0.27 (64%) | 0.065 (65%) |
| 移動子面積 [cm ²] | 150 | 120 | 50 |
| 印加電圧 [±V] | 1000 | 800 | 500 |
| 電界代表値 [kV/mm] | 3.2 | 7.6 | 12.5 |
| 発生力 [N] | 0.04 | 0.12 | 0.1 |
| 面積力密度 [N/m ²] | 3 | 10 | 20 |
| 体積力密度 [N/m ³] | 470 | 4800 | 40000 |

これに対し本研究で開発中のアクチュエータは、駆動速度が高速で、発生推力が移動子（スライダ）の位置によらず一定であるという利点がある。また、力密度も同電圧印加状態において飛躍的に大きなものを目指す。

1・5 本研究の流れ

表1・2に本研究の流れを示す。本研究は昭和62年度に発足した。昭和62～63年度は、集積化に適した素子と駆動機構の検討から始まり、本年度用いた駆動理論の基礎式を導出した。可動部であるスライダの発生推力、電極間吸引力、誘電体（スライダ）のズレによる推力への影響など、理論的検討の基礎を打ち立てた。さらにニッケル蒸着膜を電極とした拡大素子による静推力の確認実験を行っている。但し、この時点ではスライダとステータ間に働く摩擦が問題になり、実用的な推力を得るためには大幅な摩擦力低減機構の確立が必要であることが確認されている。これを受けて、マイクロファイアによる摩擦力低減実験も行われたが、空気中で1000分の1、水中で10分の1程度にまで摩擦を減らさないと実行推力は得られないという問題が残された。

平成元年度は、引き続き拡大素子による実験と理論的検討が行われた。スライダとステータ間に働く摩擦はギャップ充填剤により大幅に低減できることが分かった。またギャップ充填剤は摩擦を低減させるだけでなく、電極間の静電容量を増大させる働きがあり、実行推力の増強にも役立つことが確認された。それに伴い、ギャップ充填剤を用いた際の印加電圧条件の検討が行われた。その結果、周波数1～10[kHz]の交流が最適で、これは誘電体の持つ誘電損に起因しており、損失係数を調べることにより決定されることが分かった。

またこの年に、5電極モデルを用いてスライダの動作確認実

験も行われた。印加電圧 400 [V]、周波数 10 [kHz] の交流駆動で約 4.0 [g] あるスライダの自重を瞬時に持ち上げることが確認された。静推力も印加電圧の 2 乗に比例し、最高 400 [V] で 22.7 [mN] の推力が得られた。

平成 2 年度は推力の増強法について理論的検討を行った上、電極間内外の電位ポテンシャル差を大きく保つための、電界分離板を有するステータが試作され、その効果を確認する実験が行われた。その結果、素子と素子の間に接地した電界分離板を置くことにより、推力係数の値が電極間内外でステップ状に変化し電極間内外のポテンシャル差を大きく保てることが確認された。

表 1・2 本研究の流れ

| 年 度 | 研 究 内 容 概 略 |
|-------|---|
| S 6 2 | ・ 基本素子の駆動理論導出、及び推力増強法の理論的検討 |
| S 6 3 | ・ 拡大素子による静推力測定 ・ スライダ、ステータ間の摩擦力測定 ・ マイクロスフィアによる摩擦力低減効果確認実験 |
| H 1 | ・ ギャップ充填剤を用いた際の印加電圧条件の決定 ・ 電圧、電極長さ等の条件変化にともなう推力と理論式の妥当性確認 ・ 5 電極モデルによる動作確認実験 |
| H 2 | ・ 電界分離板による電極間内外のポテンシャル差確保確認実験 ・ 溝入りスライダ、交流電圧を用いたときの推力増強法の検討とその確認実験 ・ 基本素子材質の検討、及びギャップ充填剤沸騰の確認 |
| H 3 | ・ ギャップ充填剤の温度特性と推力に及ぼす影響 ・ スライダの周波数特性調査実験 ・ シミュレーションとモデル実験による、平面方向集積化のための最適アスペクト比確認 |

平成3年度は、平面に電極をできるだけ効率よく配置するため、最適アスペクト比に関する実験を行った。平面方向に集積化を図るには、電極間内外の電位ポテンシャル差を大きく保ちながら、できるだけ電極長さを小さくする必要がある。そのために有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションを行い、アスペクト比（電極間距離÷電極長さ）の限界値を予想した後、アスペクト比0.1から1.0まで0.1刻みのモデルを製作して実験を行った。その結果アスペクト比0.9までは電極間内外の電位ポテンシャル差が保たれ、実用的な推力が得られることが予測された。

1.6 研究目的

昨年度までの研究で、微小静電アクチュエータの基礎となる素子の駆動理論の導出、発生推力の増強法の検討を行い、ミリメートルオーダーのアクチュエータでもある程度の出力を出せることが実験により示された。比較的大きな素子でも基礎的検討をするには十分な性能を有することが確認されたことを受け、本年度は、

- ・ 素子の立体的な配置方法についてのノウハウを蓄える
- ・ 電極ピッチがミリメートルオーダーの静電アクチュエータを基礎として、多層に集積化したモデルを設計し、基礎データをとる
- ・ 将来的な実用化に備え、連続駆動の動作確認をする

ことを目的とする。

1・7 研究の進め方

多層集積形静電リニアアクチュエータの開発を行うため、以下の項目の検討を行い、実験を行う。

(1) 3次元レベルでの素子の最適配置方法の検討

静電アクチュエータの集積化を実現させるためには、極間内外の電位ポテンシャル差を大きく保ちながら、可能な限り電極の長さを小さくしなければならない。つまり、集積化のためにはアスペクト比をできるだけ大きくしたいが、アスペクト比を大きくすると力密度は小さくなる傾向にあるため、その限界点を見極める必要がある。本年度は昨年度の成果を踏まえ、アスペクト比0.6から1.5まで0.1刻みのモデルを製作し、3次元レベルでの集積に関する基礎データを収集する。

また、有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションにより、隣接する電極群からの電氣的な影響を調査し、3次元レベルでの電極の最適な配置方法を検討する。

(2) 多層集積化モデルの設計及び製作

上記の条件を満たした多層集積形静電リニアアクチュエータを設計し、製作する。これに伴う実験環境や実験装置の改良、製作も同時に進める。

(3) 性能評価

多層集積化したモデルの性能を評価する。その際、発生推力の測定、実験環境の変化に伴う性能変動に着目し、試験を行う。

(4) 連続駆動動作確認実験

連続駆動が可能な制御機構の検討を行う。直動形のリニアアクチュエータの開発を目指すため、可動部の直線的な連続駆動を可能にする制御機構を考案し、スイッチング操作による連続駆動の動作確認をする。それに伴い、位置検出機構、力一定駆動についても検討を進める。

第 2 章 設 計

2・1 緒 言

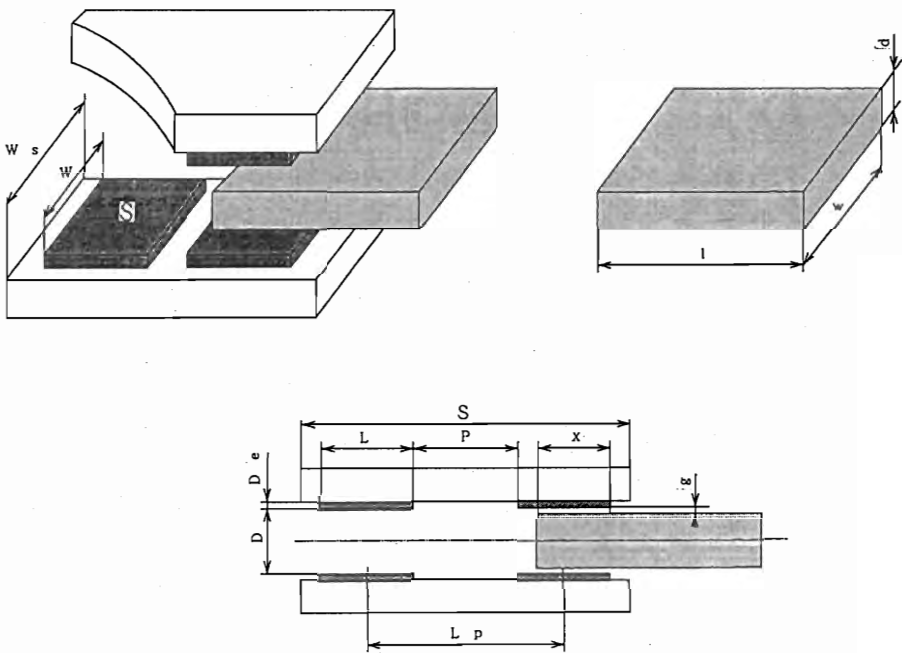
ここでは多層集積形静電リニアアクチュエータの構成要素である単体素子（1対の平行板電極とそれに挟まれた誘電体スライダ及びギャップ充填剤からなるもので、以後基本素子と呼ぶことにする）の形状を、立体的に配置した場合について決定する。1基本素子が隣接する基本素子と同じ形状をとれば良いとは限らないので、スライダやステータ等の構成材質の機械的性質、隣接する電極群からの電氣的影響等を考慮に入れて設計する。

また、力密度が高くなる基本素子の配置方法は、有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションで検討することにした。

2・2 基本構造

静電アクチュエータの各部の名称を図2・1のように定義する。本研究で製作するモデルは図2・2に示すような一対の向かい合った電極板と、その間に挿入される誘電体（スライダ）、及び隙間を満たすギャップ充填剤で構成される。電極板間に電圧を加えると電極板間に電界が発生する。その結果電極板内外の等電位線の密度の差が生じ、スライダを電極間に引き込もうとする力 F_s が得られる。同時に電極同士が引き合う力 F_v も発生する。

本研究では電極間距離をスペーサを用いて一定に保ち、 F_v による電極の変位を強制的になくし、 F_s をアクチュエータの推力として利用する。



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

図 2・1 静電アクチュエータの定義

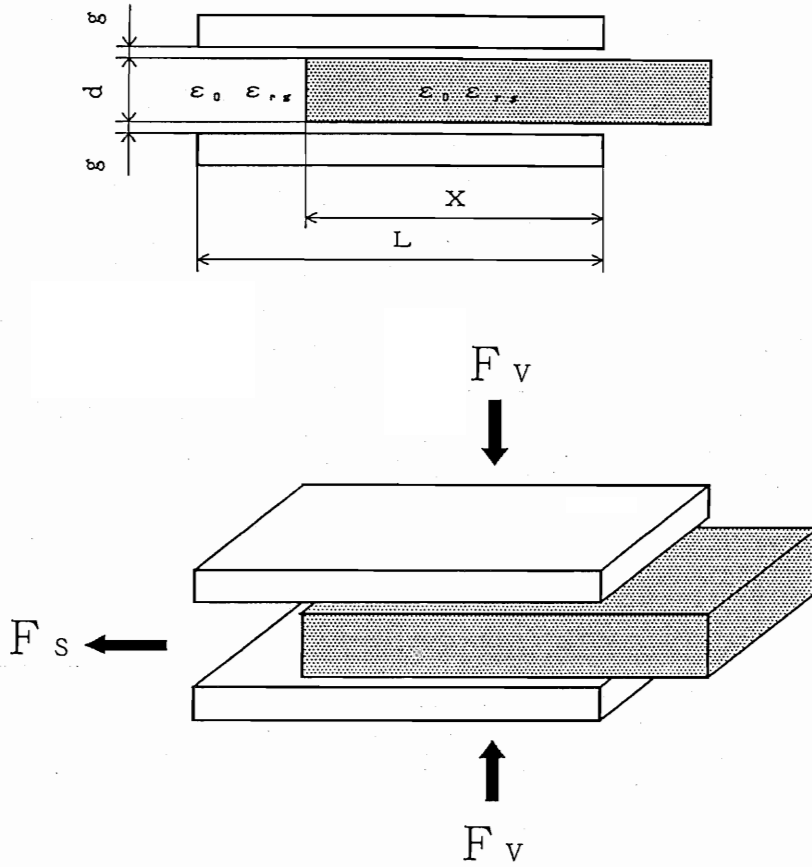


図 2・2 静電アクチュエータの基本構造

2・3 基本素子の推力増強に関わる因子

基本素子に一定電圧 \$V\$ を印加したときの、スライダの発生推力は、

$$F_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{rs} (\epsilon_{rs} - \epsilon_{re}) W d V^2}{2(2g + d) (2\epsilon_{re} g + \epsilon_{rs} d)} \quad (2.1)$$

と表される。これより各変数を表 2・1 のようにすれば推力 \$F_s\$ を大きくできることが分かる。

表 2・1 理論式における推力増強法

| | |
|--|---|
| ギャップ (g) スライダの比誘電率 ($\epsilon_{r,s}$) スライダの厚さ (d) ギャップ充填剤の比誘電率 ($\epsilon_{r,g}$) スライダの幅 (w) 印加電圧 (V) | 小さくする 大きくする 最適値にする 最適値にする 大きくする (比例関係) 大きくする (2乗に比例) |
|--|---|

式 (2・1) を見て分かるように、スライダの挿入量に関わらず推力は一定値をとる。また理論的には電極の長さ L が推力に影響しないことが分かる。このことより電極及びスライダを x 方向に n 分割すれば、同一寸法内で基本素子の n 倍の推力を得ることができ、単位面積当たりの発生推力を上げられることが分かる。この概念を図 2・3 に示す。

また、平面方向に集積化された素子群を積層化することにより、積層化した段数に比例して推力は増すことになる。この概念を図 2・4 に示す。

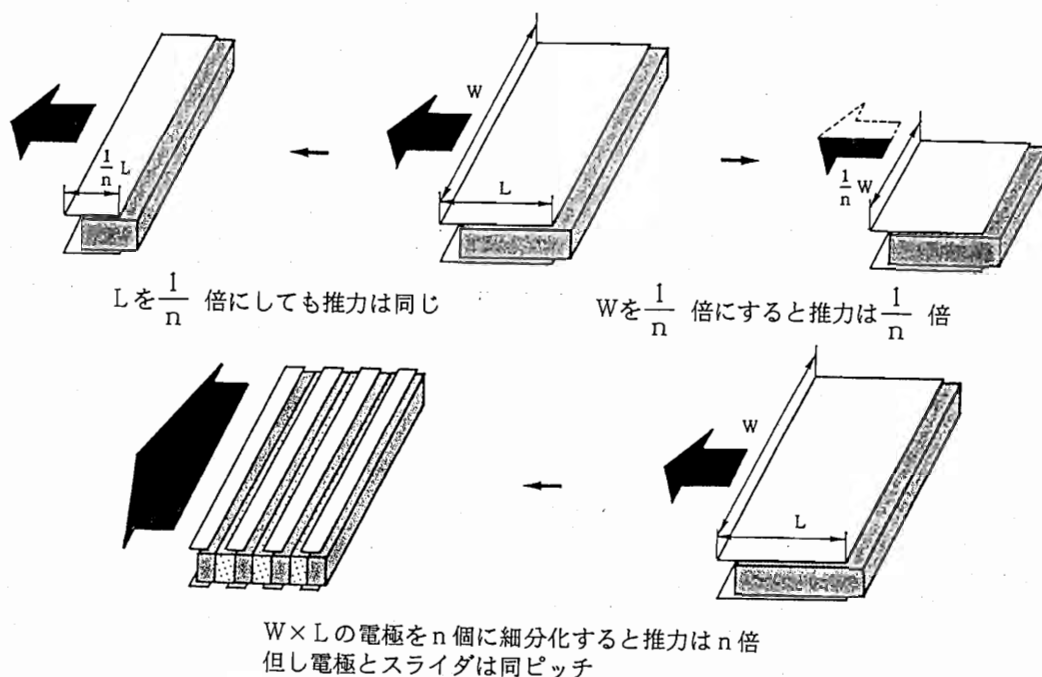


図 2・3 平面方向集積化の概念

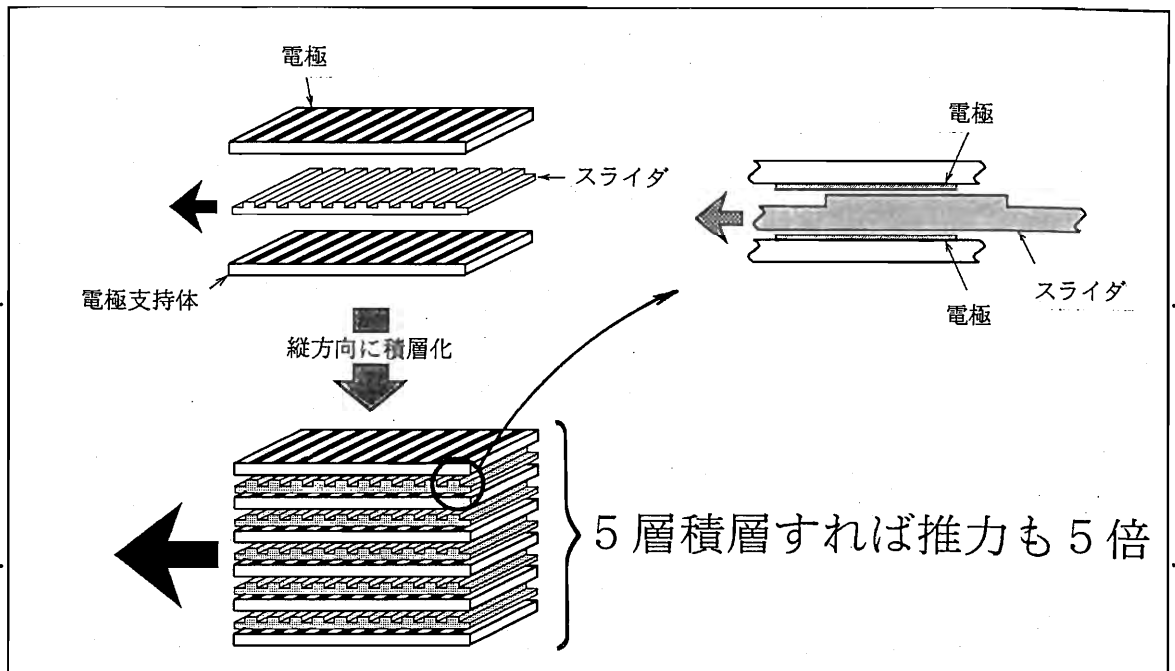


図 2 ・ 4 積層化概念

2 ・ 4 3次元レベルでの集積化方法の検討

2 ・ 4 ・ 1 空間的な電極配置パターン

今まで述べてきた発生推力及び推力の増強法は理論式によるもので、実際には端効果があるため集積化の際には電極間内外の電位ポテンシャル差に注意を払わなければならない。端効果とは、電極の端部に近づくとつれて電気力線が一様でなくなる現象で、平行平板コンデンサの場合は図 2 ・ 5 のようになる。

端効果によって電極の縁に電荷が溜まり、コンデンサの静電容量は僅かに増加する。この現象をファイマンは、端効果を考慮した場合の静電容量を近似的に表すには、電極を人為的に電極間隔の 8 分の 3 だけ伸ばして得られる面積を使えば良いとしている。一对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上昇につながる。しかし

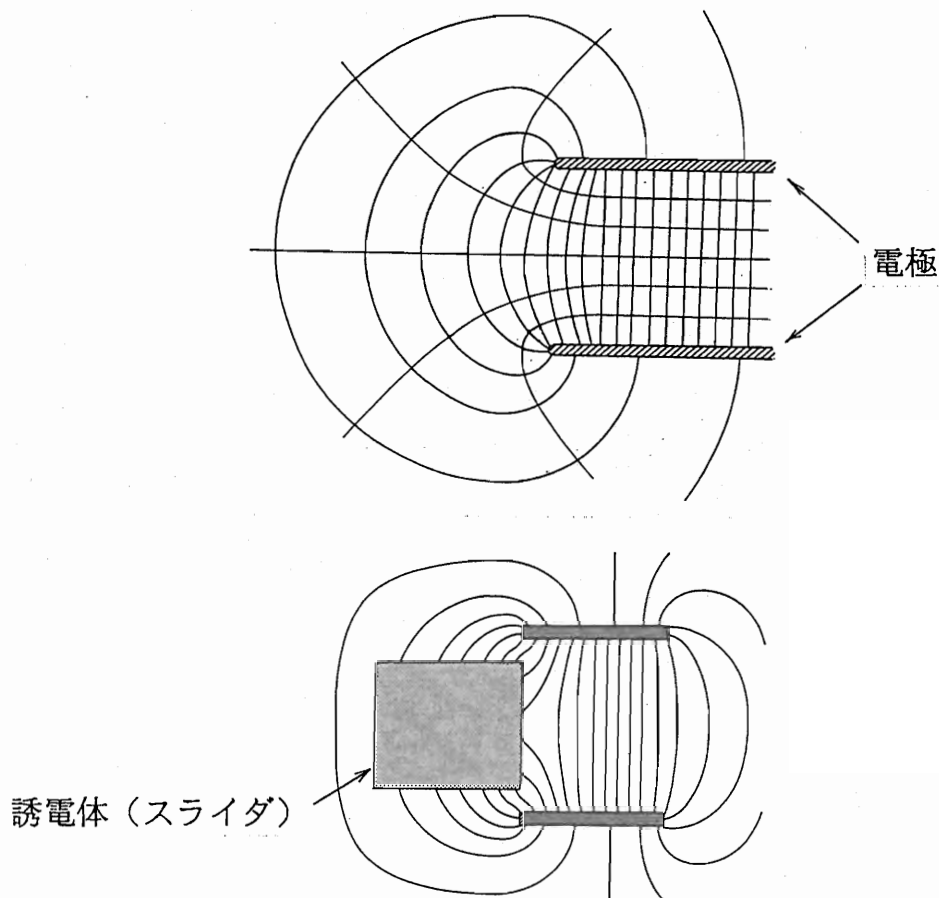


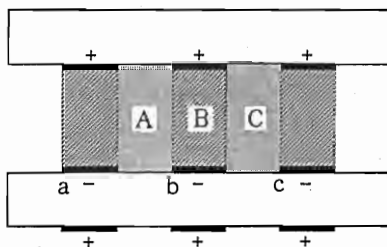
図 2 ・ 5 平行平板コンデンサの端効果の様子

基本素子の集積化を図る場合には、電極間内外の電位ポテンシャル差が実質的に小さくなるので不利に働く。端効果を完全に消滅させることは不可能であるので、電極を集積化するには有限要素法や境界要素法等を用いた数値計算によって、端効果が推力に影響を及ぼさないか確認する必要がある。

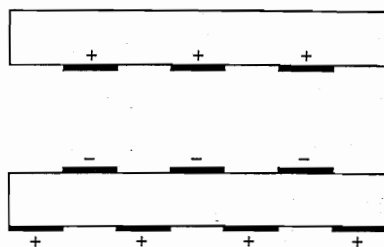
この端効果の様子はアスペクト比や素子の構成材質、電極の配置パターン等によって複雑に変わる。ここでは初めに集積化する際の空間的な電極配置パターンを検討する。

図 2 ・ 6 の (1) に示すように電極 a, b, c が空間 A, B,

C, にどのような影響を及ぼすか等, 空間的な電極の配置パターンによる電気的影響を考慮に入れるため, 図 2・6 の (1) から (4) に示す 4 通りの電位分布シミュレーションを行った. その結果を図 2・7 に示す.



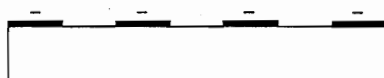
(1) 電極配置 1



(2) 電極配置 2



(3) 電極配置 3



(4) 電極配置 4

図 2・6 電極配置の様子



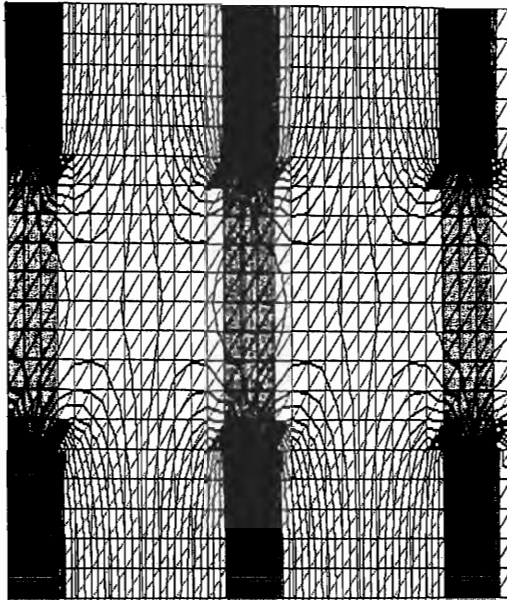
ギャップ充填剤



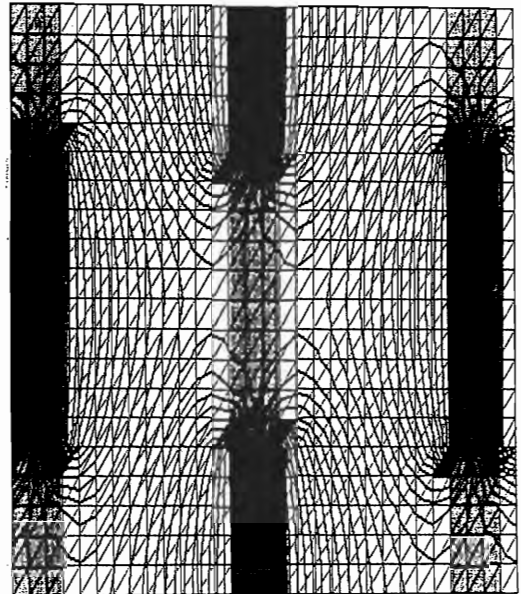
+ 電極



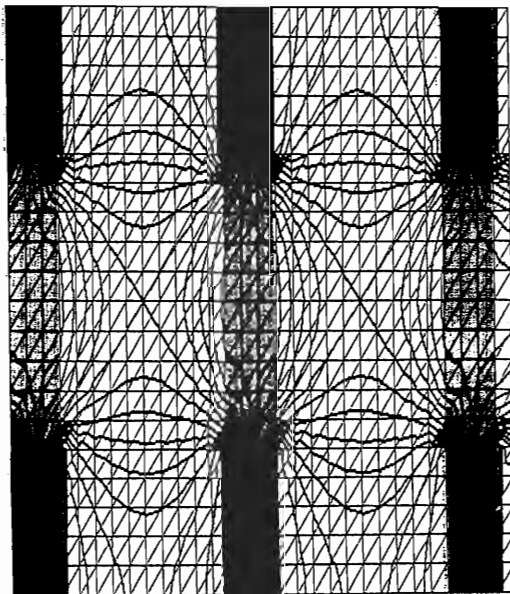
- 電極



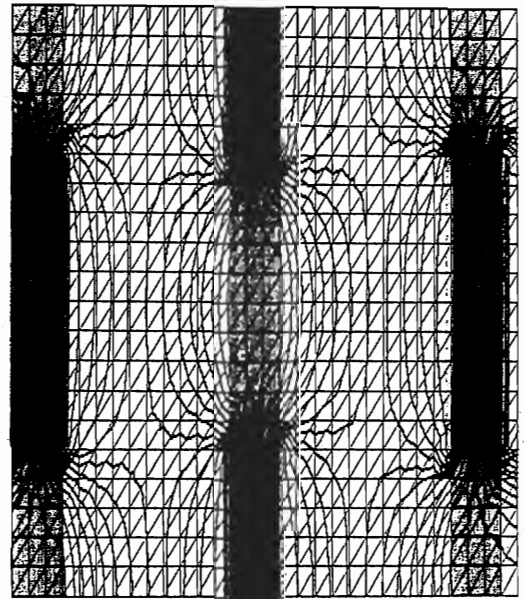
(1) 電極配置 1



(2) 電極配置 2



(3) 電極配置 3



(4) 電極配置 4

図 2 ・ 7 電極の極性配置の違いによる電位分布の様子

まず電極の極性配置の違う図2・7の(1)と(3)であるが、ステータ内部の電位分布の様子に違いは見られるものの、電極間内外(図2・6(1)に於ける空間Bが電極間内、空間A、Cが電極間外)の電位ポテンシャル差はほぼ同じと見て良い。図2・7の(2)と(4)についても同様なことが言える。

また、電極をステータの表裏同じ場所に配置した電極配置1, 3と、互い違いに配置した電極配置2, 4を比較しても、電極間内外の電位ポテンシャル差に殆ど違いは見られない。このことから、積層化する場合の電極配置の違いによって、発生推力は殆ど変化しないと思われる。

2・4・2 ステータの厚み

図2・4に示した通り積層化すれば推力は積層化した段数に比例して大きくなるが、基本素子の厚みをできるだけ薄くすることにより力密度を大きくすることが望まれる。

図2・8にアスペクト比0.1, 0.5, 1.0の3種類各々について、ステータの厚みを変えた電位分布シミュレーションを示す。図を見ると、アスペクト比を大きくする程電極間内外のポテンシャル差は小さくなっているものの、どのアスペクト比の場合でも、ステータの厚みによる電極間内外の電位ポテンシャル差に違いは認められない。

次に、本年度集積化モデルに適用したアスペクト比0.8の素子について、コンピュータ処理できる限界までステータを薄くしていった。その様子を図2・9に示す。このシミュレーション結果を見ても、ステータの厚さをギャップの8分の1にしているにも関わらず、電極間内外の電位ポテンシャル差は全く変化していないことが分かる。

以上の結果、素子の設計の際アスペクト比の選定に注意を払えば良く、ステータの厚さによる電氣的な影響は考慮しなくて

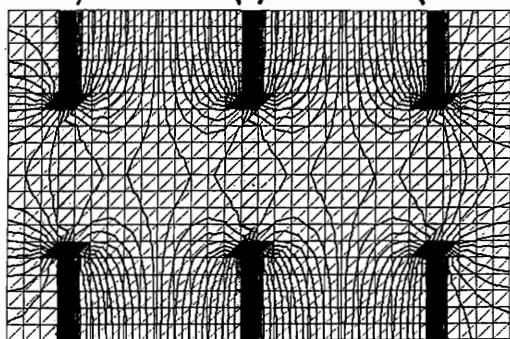


ギャップ充填剤

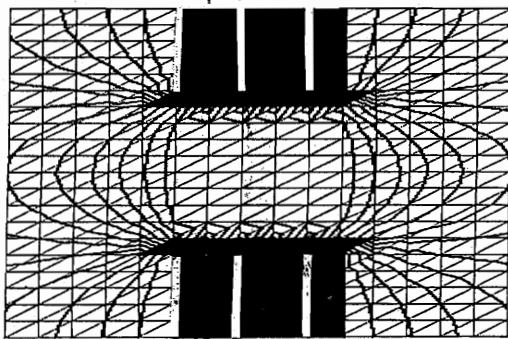
— + 電極

— - 電極

ステータ (厚)

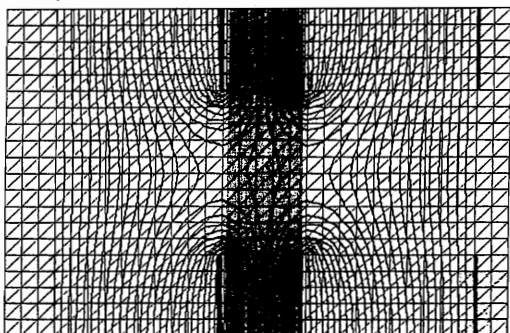


ステータ (薄)

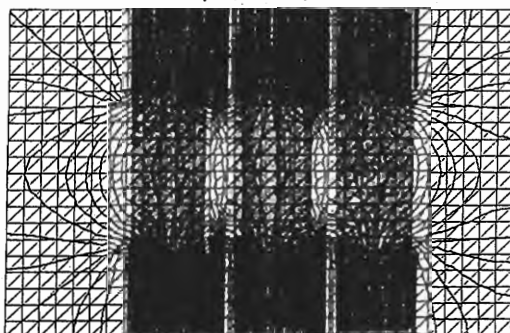


(1) アスペクト比 0. 1

ステータ (厚)

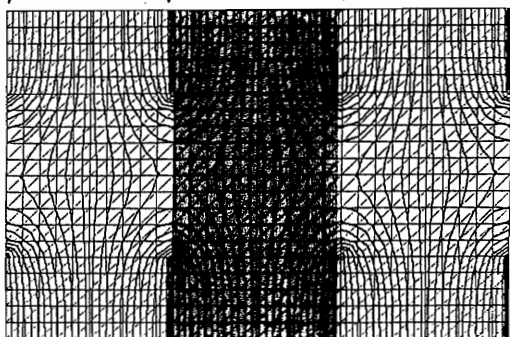


ステータ (薄)

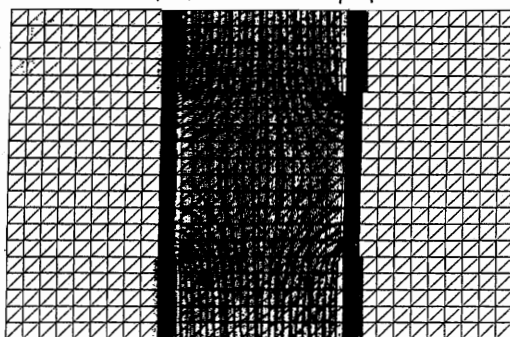


(2) アスペクト比 0. 5

ステータ (厚)



ステータ (薄)



(3) アスペクト比 1. 0

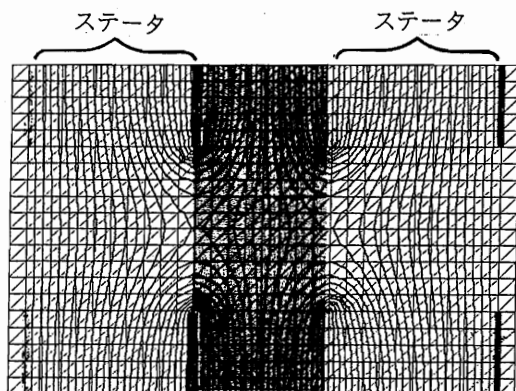
図 2・8 アスペクト比別の電位分布の様子



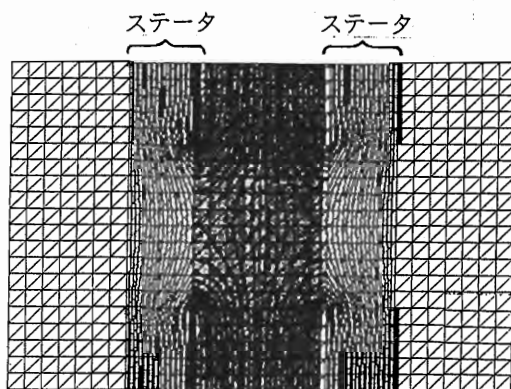
ギャップ充填剤

— + 電極

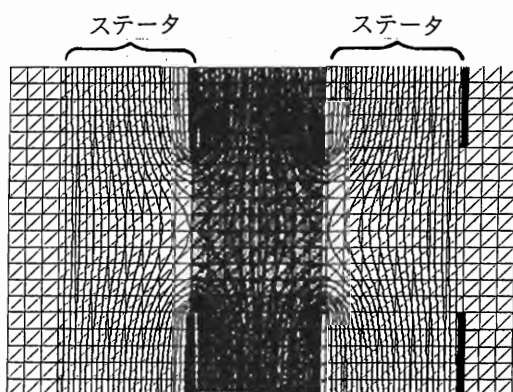
--- - 電極



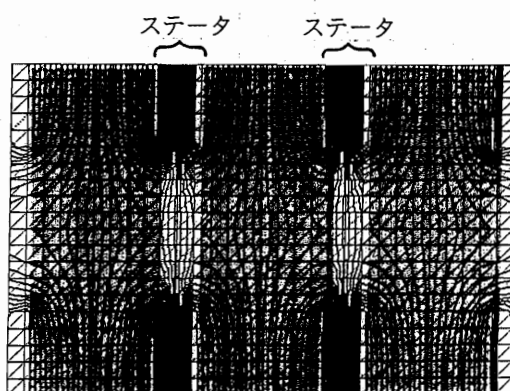
(1) ステータ厚 1



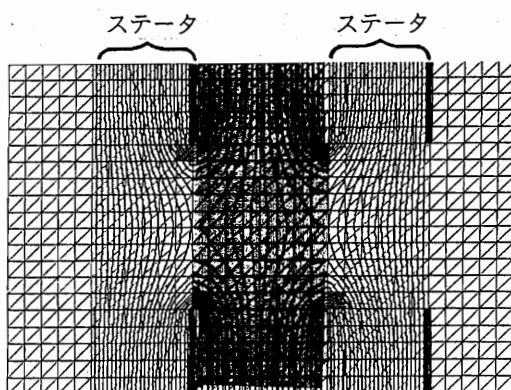
(4) ステータ厚 4



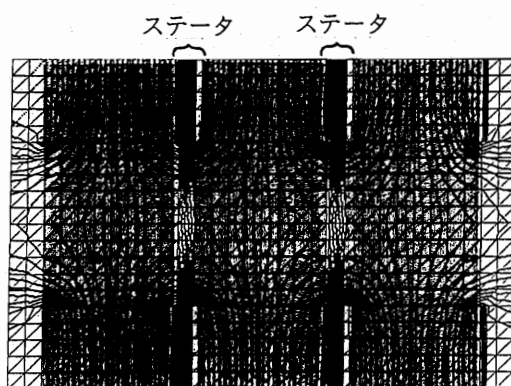
(2) ステータ厚 2



(5) ステータ厚 5



(3) ステータ厚 3



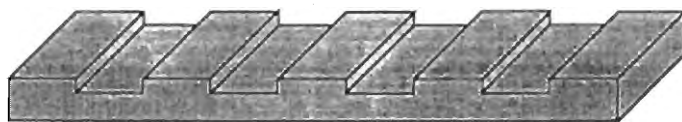
(6) ステータ厚 6

図 2・9 アスペクト比 0.8 の電位分布の様子

良いことが確認された。

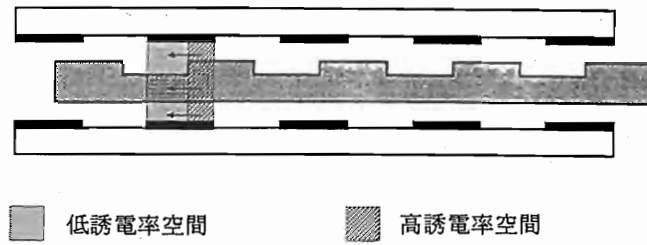
2・5 スライダー

昨年度までの成果を受けて、本年度も従来通りファインセラミックスをスライダとして用いる。形状は図2・10に示す通り、均質材料でできた高誘電体に精密溝加工技術を用いて溝を彫り、スライダの厚みの変化で巨視的に見た静電容量及び誘電率の変化を持たせようと言うものである。表2・2に本年度用いた東芝セラミック(株)製のチタン酸ジルコン酸鉛T-96の機械特性を示す。このセラミックは比較的加工性が良く、従来のものに比べ溝研削に有利である。しかし、表に示す通りセラミックスの特性である破壊靱性の小ささは避けられないため、薄い平面状に加工するのは容易ではない。将来的には異方性エッチングのような溶解除去加工などの技術を応用し、加工面での検討を進めるとともに、新素材の調査も同時に進めることが望まれる。



(1) 溝入りスライダ

図2・10 溝入りスライダの形状と推力の発生方向(その1)



(2) 極板間の低誘電率空間と高誘電率空間

図 2・10 溝入りスライダの形状と推力の発生方向 (その2)

表 2・2 T-96 の機械特性

| | | |
|-------|-----------------------|-------------------------|
| 曲げ強さ | kg / mm ² | 9. 6 |
| ヤング率 | kg / mm ² | 5. 8 × 10 ⁴ |
| 破壊靱性 | MN / m ^{3/2} | 1. 0 |
| ポアソン比 | | 0. 33 |
| 硬 度 | | 320 |
| 密 度 | kg / m ³ | 7. 66 × 10 ³ |
| 比誘電率 | | 2000 |
| キュリー点 | °C | 290 |

一般的にセラミックスは断熱性、耐熱性に優れており、熱膨張や温度による特性変化を気にせず設計できる素材の一つである。しかし、製作コストや寿命に問題があり、両手放しで歓迎できない一面もある。本研究では誘電率の高いスライダが推力増強の上で求められるが、加工上の問題もあり、一概に誘電率の高いものを選べない状況がある。

また、図 2・10 に示した通り特殊な形状をしているため、応力集中箇所がある上、構成物質の結合様式が複雑なため強度がばらついている。このため材質の強度計算が困難であり、強度特性の観点からどこまでスライダを薄くするかは決定し難い。

本年度は、理論上最低限望まれる力密度と、加工時の破損ができるだけ少ない妥協点として、スライダ厚を0.5 [mm]とし、溝深さが0.2 [mm]のものを用いることにした。

また図2・11に示すように、溝は片面だけでなく、両面とも0.1 [mm]ずつ研削することによりスライダの反りを防止することにした。



図2・11 両面を溝研削したスライダ

2・6 素子の寸法, 精度

2・4・2節の考察により、ステータ厚さによる電氣的な影響の変化はないことが分かった。しかし、実際問題として機械的性質面からの厚み限界は存在する。以下、順を追って検討する。

2・6・1 極板間吸引力に対する考慮

本研究で製作する静電リニアアクチュエータは、図2・10に示すように1対の電極が構成する平行平板コンデンサと誘電体からなるサンドイッチ構造で、そのギャップにギャップ充填剤を注入した形になる。ステータはスペーサで固定してあるため、極板間吸引力によるステータの垂直方向の移動はない。従

ってギャップ管理はこのスペーサで行われることになる。式(2・1)で示した通りギャップは極力小さい方が推力増強の点では有利である。しかしこの極板間吸引力 F_v は推力 F_s のほぼ100倍の大きさがある(式2・2)ため、ステータにたわみが生じる可能性が考えられる。

$$F_v = \frac{\epsilon_0 W L V^2}{2(2g+d)^2} \frac{\epsilon_0(\epsilon_{r,s}-1)\{4g\epsilon_{r,s} + (\epsilon_{r,s}+1)d\} W d V^2 X}{2(2g+d)^2 (2g\epsilon_{r,s}+d)^2} \quad (2.2)$$

たわみによりステータとスライダの間に摩擦が生じ、推力の減少があつては、ギャップを小さくする意味がなくなる。ここでは以下の仮定の基にステータのたわみを算出する。

- ・ 安全率を考慮して、ステータの表面積全面が電極とする。
- ・ 電極間吸引力は、

$$F_v = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r,s} W V^2}{2D^2} \quad (2.3)$$

を用い、諸元の値は、

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= 8.854 \times 10^{-12} \quad [F/m] \\ \epsilon_{r,s} &= 80.1 \\ W &= 20 \quad [mm] \\ V &= 200 \quad [V] \\ D &= 0.564 \quad [mm] \end{aligned}$$

とする。

計算の結果、ステータがスライダの平行度及び平面度の10倍に当たる10[μm]以上たわまないためには、ステータの厚みは8.981[μm]以上にとれば良いことが分かった。

これはスライドの55分の1以下の薄さである。

10 [μm] は本年度用いた素子のギャップの3分の1以下であり、仮にたわんだとしても摩擦による推力低下には及ばない。また、ステータの厚さは集積化する上でできるだけ薄い方が好ましいが、配線や実験上の都合で扱い易い厚みがあった方が好ましい。

以上の結果、ステータの厚みは電極間吸引力の影響を考慮に入れる必要はなく、加工上の制限や実験時の取扱い易さ等によって決定すれば良いと言える。本年度は実験上の利便性を優先し、計算上予測される最低限の力密度を満足する1 [mm] をステータ厚とする。

2・6・2 表面の精度に関して

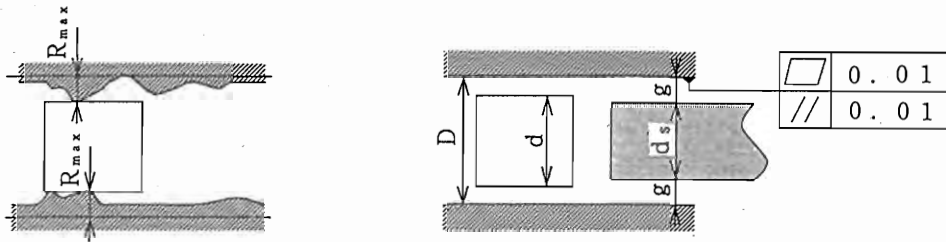
寸法誤差によりどれ程推力が変動するか考えてみる。

ステータ（石英ガラス）の平面度を昨年度同様1 [μm] とするには、加工の都合上から3 [mm] 以上の厚みが必要になる。その場合積層化したときの力密度が当初の目標より大幅に落ち込んでしまう。そこでステータの材質を石英ガラスから一般の板硝子に変更した場合を検討した。その結果、

- ・ 電位分布シミュレーションの結果、石英ガラスの場合と大差はない。
- ・ 電極膜（ITO膜：酸化インジウムと酸化錫の混合物）をプリントする際、材質の親和性が悪いため、別素材を板硝子にコーティングせねばならない。
- ・ 石英ガラスに比べコストは大幅に削減できるが、強度が低いため信頼性に欠ける。

等の特徴があり、やはり石英ガラスでステータを製作すること

が望まれた。厚さを1 [mm] とするためには各寸法精度を5 [μm] 以上に落とさなければならない。そこで理論式を用いて推力の最大変動率を算出することにした。



(1) 表面粗さ概念図

(2) 推力最低時の諸元

図 2・12 精度による推力変動

ステータに関しては図 2・12 の (1) に示すように、スペーサとステータの接触点に表面粗さの最大高さ R_{max} が存在した場合に推力は最低値をとる。その他の諸元を簡単のため、以下のように定めることにする。

$$d_s = 0.49 \text{ [mm]} \text{ (最低値)}$$

$$D = 0.585 \text{ [mm]} \text{ (d : 最高, 平面度 : 最高)}$$

$$g = (D - d_s) \div 2 = 0.0475 \text{ [mm]}$$

$$d_o = d_s - (0.1 + 0.01) \times 2 = 0.27 \text{ [mm]}$$

以上の値の時推力は最低値をとる。溝入りスライダの理論推力は、

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta C(\alpha)}{\delta \alpha} \cdot V^2$$

$$= \epsilon_0 \epsilon_{r_g} \epsilon_{r_s} \left\{ \frac{1}{\epsilon_{r_g} d + 2\epsilon_{r_s} g} - \frac{1}{\epsilon_{r_g} (d - d_c) + \epsilon_{r_s} (2g + d_c)} \right\} \cdot V^2 \quad (2.4)$$

である。 $V = 200$ [V] としてこの式に正規の値を代入すると、

$$F_s = 0.1307 \text{ [mN]}$$

となる。次に、 $F_{s(\min)}$ の場合の各寸法を代入すると、

$$F_{s(\min)} = 0.0858 \text{ [mN]}$$

となる。従って、

$$F_{s(\min)} \div F_s \times 100 = 65.66 \%$$

となり、精度を1桁落としても考えられる推力最低値が正規の推力の7割近く発生する。以上の結果、力密度を大きくしたいこともあり、いたずらに高精度を要求する必要がないことが確認された。

2.7 小括

ここでは基本素子を立体的に集積化するための検討を行い、以下のことが分かった。

- ・空間的な電極配置パターンは推力に影響を及ぼさない。
- ・ステータの厚みも推力に影響を及ぼさない。
- ・スライダは加工上の理由で厚さ 0.5 [mm] のものを用いる。
- ・電極間吸引力によるステータのたわみは考慮に入れる必要がない。
- ・加工精度は従来より1桁落とした、平面度、平行度それぞれ 10 [μm] を用いても推力はさほど変化せず、返って力密

度の上昇が期待される。

これ等を全て考慮に入れ設計したステータ、スライダの図面を付録に示す。電極の配置パターンは実験上の便利を優先し、図 2・6 の (1) を採用することにした。

第 3 章

推力係数測定試験

3・1 緒言

従来の静電氣を利用したアクチュエータは集積化が困難なため、出力は極めて小さな値でしかなく、マイクロメートルの大きさの対象物を操作するのがやっとといった状況にある。実用レベルの出力を得るにはアクチュエータ素子の集積化が鍵となっている。

また、静電アクチュエータは平面力で駆動し、体積力を利用した電磁形のアクチュエータに比べ、基本素子を小さくすればする程力密度の点で有利になる。但し、多層集積化する際にはいたずらに電極長さ L を短くして小形化するのではなく、力密度をできるだけ大きくなるように集積化するのが好ましい。従って、その限界点となるアスペクト比を見極める必要がある。

本年度製作したアスペクト比 0.8 のモデルは、第 2 章で述べた通り実験上の便利を最優先して製作した。有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションでは、アスペクト比 0.8 は多層集積化する上で妥当であることが確認されたが、将来的に電極長さを小さくする場合、最適なアスペクト比を実験により求めることが望まれる。

ここでは最適なアスペクト比を見いだすため、昨年度の成果を踏まえてアスペクト比 0.6 から 1.5 まで 0.1 刻みで 10 種類のモデルを製作し、新たな評価方法を考案してデータ処理を行う。

3・2 推力係数の概念

実際に推力を計測しなくても、静電容量を計測すればその変化から推力が計算により求められる。その理由は以下による。

静電リニアアクチュエータの基本素子の推力は、式(2・4)に示した通り、

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta C(x)}{\delta x} \cdot V^2 \quad (3.1)$$

のように書き表すことができる。この式より静電容量 $C(x)$ と、その時のスライダ挿入量 x を連続的に測定すれば、

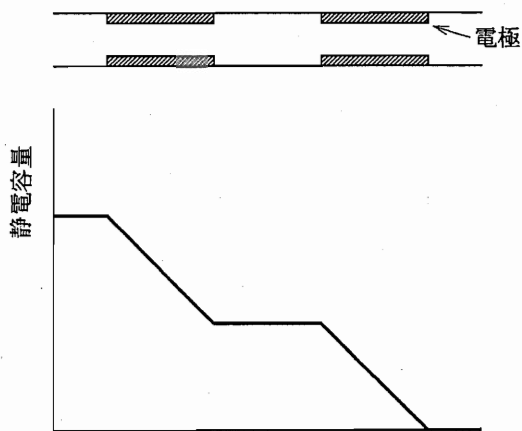
$$\frac{\delta C(x)}{\delta x} \quad (3.2)$$

が差分方により求められる。これに電圧 V の 2 乗を掛ければ、比例定数 0.5 の一次関数として推力 F_s が間接的に求められる。そこで式(3・2)を推力係数と呼ぶことにし、これを用いて最適アスペクト比の検討を行うことにした。

3・3 推力係数の理論値と実験値

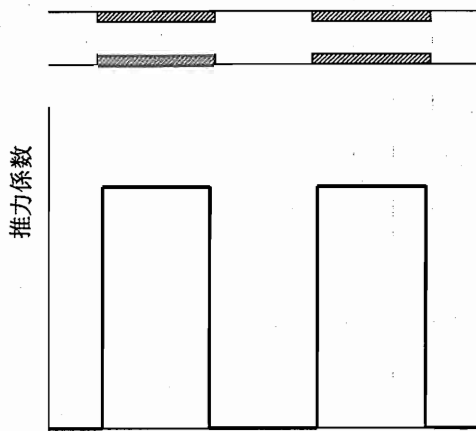
スライダを電極間内に挿入していった時の静電容量の理論的な変化の様子は、図 3・1 に示すように定数部と 1 次式から成る階段状のグラフになるはずである。推力係数はこのグラフの傾きである。従って、図 3・2 に示すように測定位置によってステップ状に変化する方形波になる。

しかし実際には端効果などにより電界は一様に分布せず、電極間外でも静電容量は計測できる。このことを考慮した実際の静電容量の変化は、図 3・3 に示すように挿入量に対し角がとれた曲線状に変化する。従って、推力係数も完全な方形波には



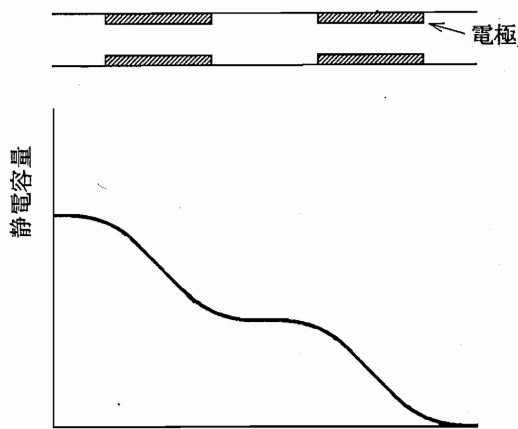
スライダ引き抜き量 x

図 3・1 理論静電容量



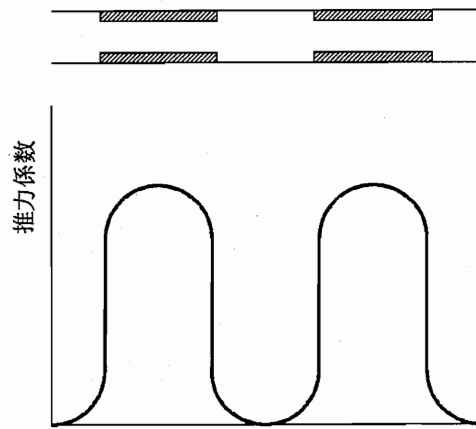
スライダ引き抜き量 x

図 3・2 理論推力係数



スライダ引き抜き量 x

図 3・3 静電容量実験値



スライダ引き抜き量 x

図 3・4 理論推力係数実験値

ならず、図 3・4 に示すようになる。この傾向はアスペクト比を大きくする程顕著になり、遂には図 3・5 に示すように電極間外での推力係数が上昇し、電極間内外のポテンシャル差が小さくなっていく。この状態は巨視的に見ると、図に示すように電極長さ L が大きな一つの電極と等価になる。

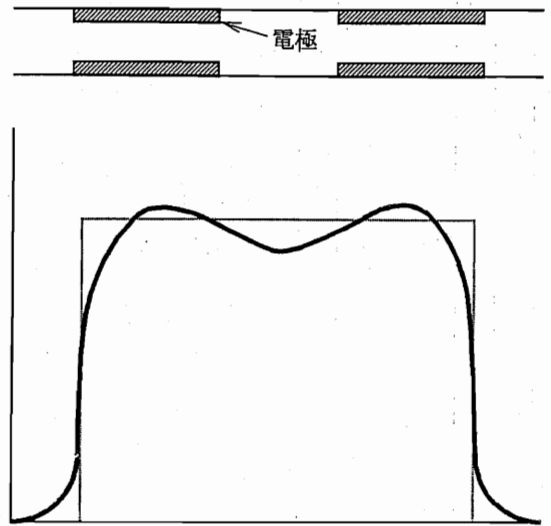


図 3・5 ポテンシャル差減少

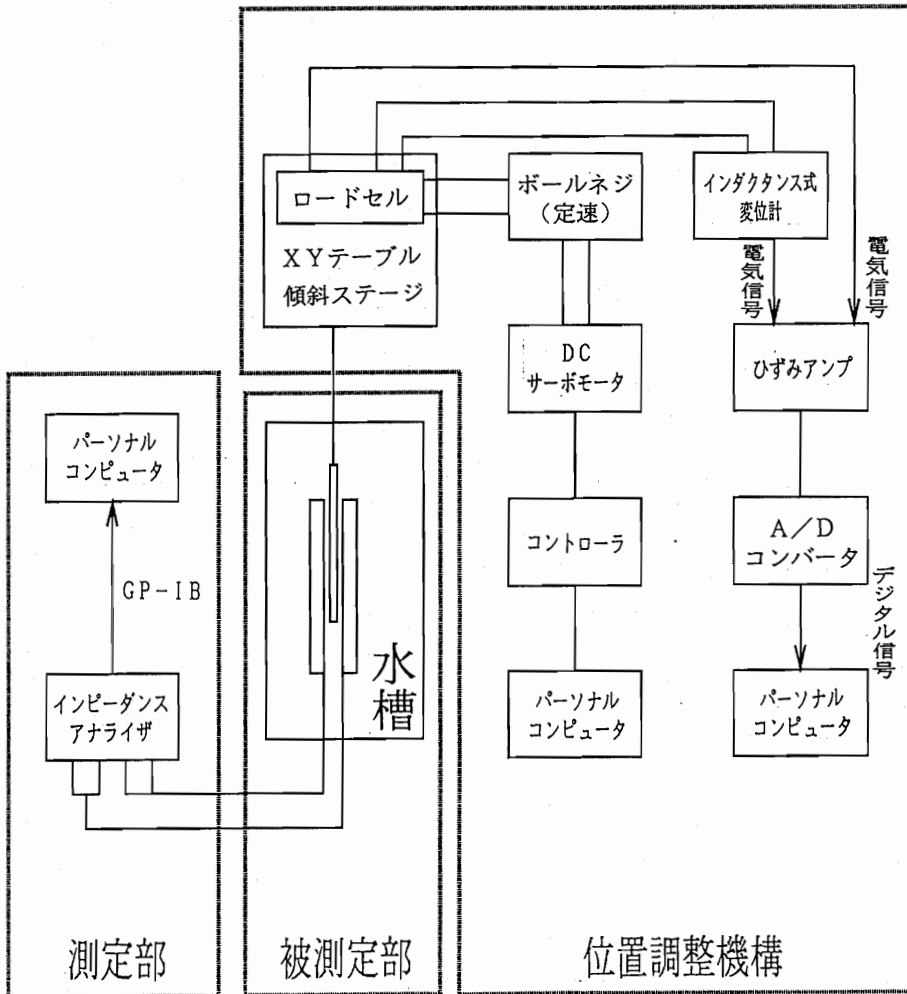
こうなると電極間内外のポテンシャル差を利用する本研究の駆動原理にとって、集積化する意味がなくなる。

既に第 2 章で述べたように、理論的にはいくら電極を小さくしても基本素子 1 つ当たりの発生推力は一定である。従って、 n 個の基本素子を集積化したとすれば n 倍の推力が得られるはずである。しかし実際問題として n 個の電極を集積化したとしても、それぞれの電極がポテンシャル差を保っていない 1 つの大きな電極と等価になってしまえば、1 つの基本素子分の推力しか得られない。小さなスペースの中にできるだけ多くの基本素子を並べることは力密度を上げる上で重要であるが、電極間内外のポテンシャル差が保てなければ 1 つの大きな電極と同様になり、返って推力を低下させてしまう。

そこで実験値の推力係数を基に、集積化する際の最適アスペクト比を求めることが必要になる。

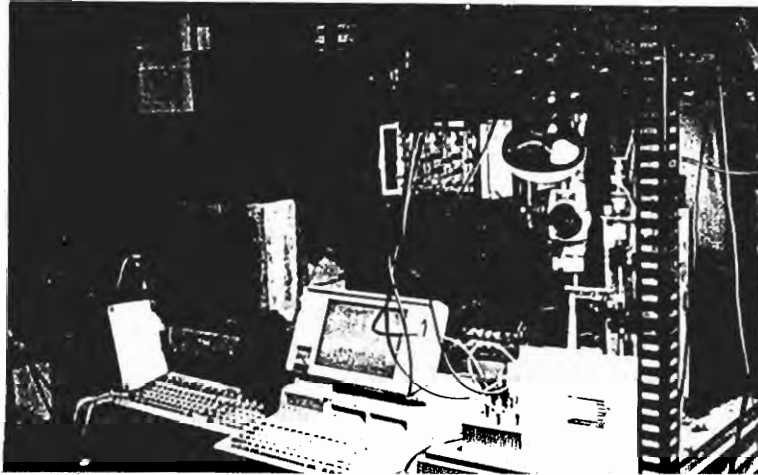
3・4 実験装置

素子の推力係数を求めるため、インピーダンス・アナライザを用いて静電容量を計測する機器構成とした。実験装置は被測定部、測定部、スライダの位置を制御する位置調整機構で構成される。図3・6に実験装置の外観と構成を示す。



(1) 実験装置構成

図3・6 実験装置の構成と外観(その1)



(2) 実験装置外観

図 3 ・ 6 実験装置の構成と外観 (その 2)

3 ・ 4 ・ 1 被測定部

(1) 電極体 (ステータ)

電極及び電極支持体から構成され、石英ガラス製の電極支持体上にITO膜を電極として設置した。ITO膜の形成にはスパッタリング法を用いた。また、隣接する電極の影響を考慮し、1つのアスペクト比につき2つの電極を用意した。

図 3 ・ 7 にその外観を示す。

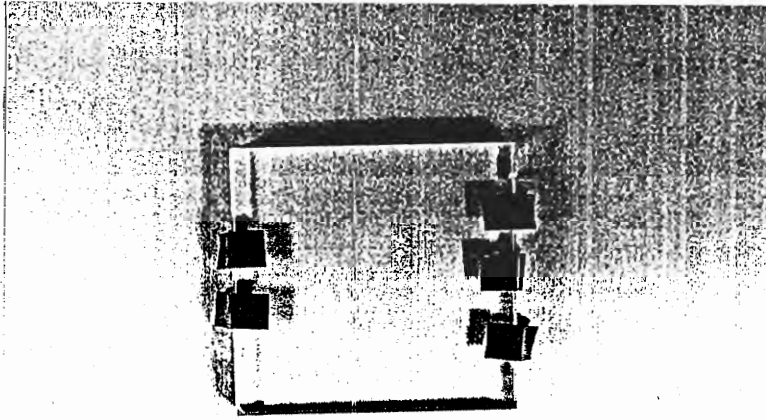


図 3 ・ 7 電 極 体 外 観

(2) ス ラ イ ダ

表 2 ・ 2 に 機 械 的 性 質 を 示 し た 東 芝 セ ラ ミ ッ ク (株) 製 の T - 9 6 の 薄 板 (厚 さ 0 . 5 [m m] , 幅 4 0 [m m] , 長 さ 9 0 [m m]) に , 深 さ 0 . 1 [m m] の 溝 を 両 面 に 彫 り , 2 ・ 5 節 で 述 べ た 両 面 溝 入 り ス ラ イ ダ と し て 加 工 し た .

但 し , こ の ス ラ イ ダ に 溝 を 彫 っ た の は , 後 の 連 続 駆 動 動 作 確 認 実 験 と 共 通 の ス ラ イ ダ を 使 用 す る た め で あり , 本 実 験 で は 先 端 の 溝 を 彫 っ て い な い 部 分 の み を 計 測 に 用 い た .

ス ラ イ ダ の 外 観 を 図 3 ・ 7 に 示 す .

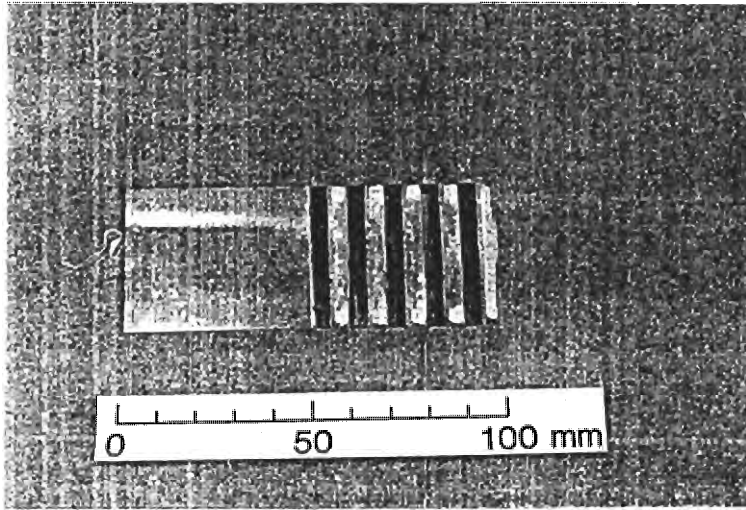


図 3 ・ 7 溝入りスライダの外観

(3) ギャップ充填剤及び水槽

素子全体をギャップ充填剤中に浸すため、アクリル樹脂で水槽を製作し、その中に素子を装着してギャップ充填剤を注入した。尚、ギャップ充填剤は比誘電率が80.1(文献値)と高く、化学的にも安定で入手し易い蒸留水(精製水)を用いた。

3 ・ 4 ・ 2 測定部

静電容量を測定するのに、インピーダンス・アナライザ(横河・ヒューレットパカード(株)製、付録参照)を用いた。最小分解能は0.1 [f F] で、GP-IBインターフェースを介

してデータをパーソナル・コンピュータ（日本電気（株）製）に取り込んだ。

3・4・3 位置調整機構

位置調整機構は大きく分けて2つの部分からなる。一つはスライダと電極の位置関係を微調整するXYテーブル、傾斜ステージ、デジタルリニアゲージ、及び電極ホルダからなる部分、もう一方はスライダの鉛直方向の位置制御を行う運動機構である。

前者はスライダの挿入量を正確に変化させ、鉛直方向と平行度の位置調整を行うために新たに設置した。またスライダ挿入量は、デジタルリニアゲージを用いて10 [μm]のオーダーまで監視して実際のスライダの挿入量を計測し、スライダ傾斜角は傾斜ステージにより精度5'まで監視する。

運動機構はパーソナル・コンピュータ、DCサーボモータ、ボールネジ、リニアガイドで構成されDCサーボモータの回転を測定部の等速直線運動に変換して使用する。尚、コントローラとパーソナル・コンピュータの接続はRS-232Cを用いた。

3・5 実験方法

図3・9に示すように、スライダを電極に挿入した状態から徐々に引き抜いて行きながら静電容量を計測した。また、電極の端に於ける端効果の影響を考慮するため、測定はスライダの先端が電極に挿入される手前から、電極を完全に通り過ぎた地点までを測定範囲とした。各アスペクト比のスライダの引き抜きステップ量は表3・1に示す通りである。尚、スライダの変位量はパーソナル・コンピュータから入力した変位量ではなく、

基準点からの変位量をデジタルリニアゲージを用いて監視し、その値を実際の変位量とした。

スライダと電極の具体的な位置関係を図 3・10 に示す。

表 3・1 各アスペクト比におけるスライダ引き抜きステップ

| アスペクト比 | 測定位置数 | 電極長さ [mm] | スライダ引き抜きステップ。 [mm] |
|--------|-------------|--------------|-----------------------|
| 0.6 | 31 | 0.94 | 0.12 |
| 0.7 | 30 | 0.81 | 0.10 |
| 0.8 | 28 | 0.71 | 0.10 |
| 0.9 | 28 | 0.63 | 0.10 |
| 1.0 | 28 | 0.56 | 0.09 |
| 1.1 | 28 | 0.51 | 0.08 |
| 1.2 | 28 | 0.47 | 0.07 |
| 1.3 | 28 <td 0.43 | 0.07 | |
| 1.4 | 28 | 0.40 | 0.06 |
| 1.5 | 28 | 0.38 | 0.06 |

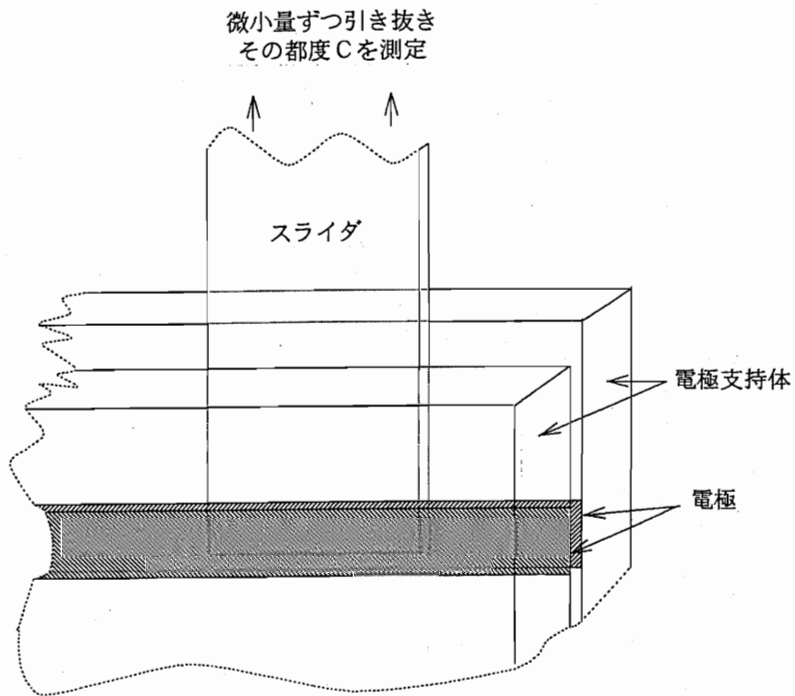


図 3・9 スライダ引き抜きの様子

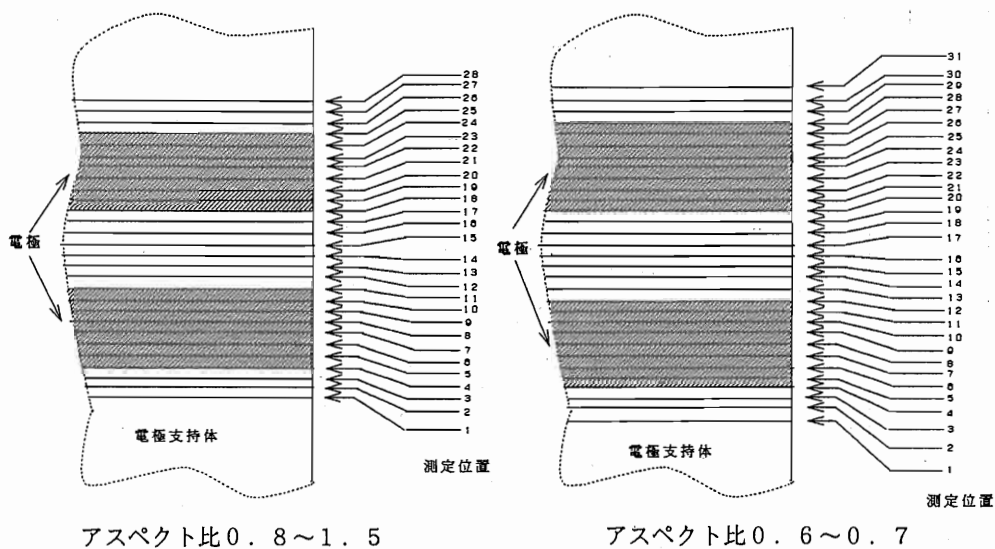
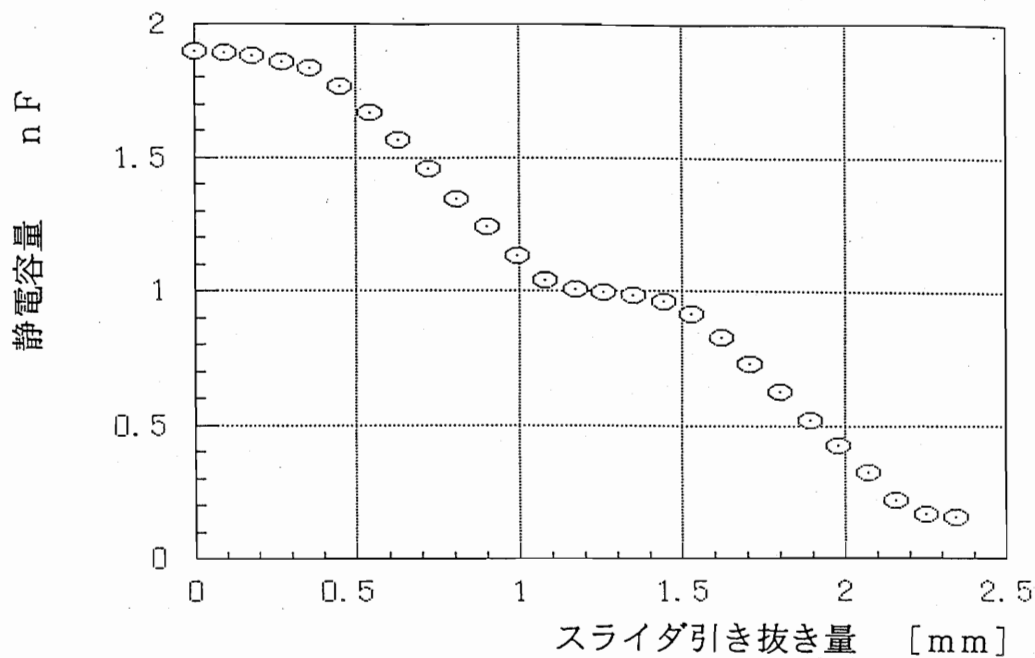


図 3・10 計測位置

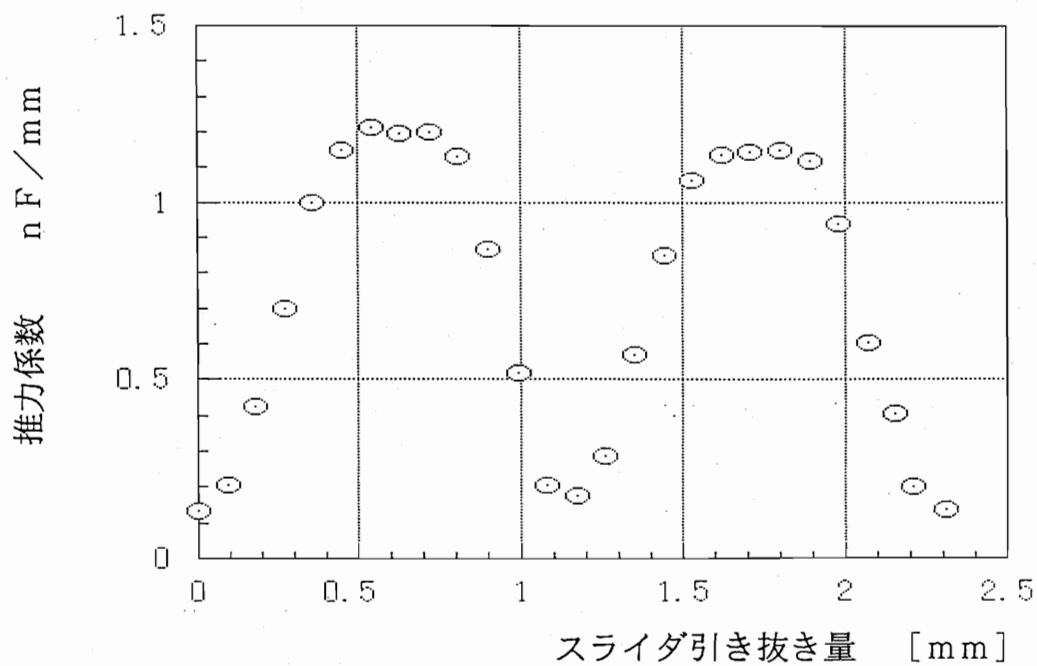
また、アクチュエータを駆動する際に安定かつ損失係数が小さくなる最適駆動周波数は 10 [kHz] ⁵⁾と分かっているため、測定周波数もこれに倣った。

3・6 実験結果

図 3・11 に実験結果の一例としてアスペクト比 1.0 の実験結果を示す。3・3 節で述べた通り静電容量は挿入量に対し階段状の曲線となって変化し、推力係数は完全には方形波になっていない。しかし電極間内外のポテンシャル差は保たれており、この程度なら集積化する意味があると言える。



(1) 静電容量



(2) 推力係数

図 3・11 アスペクト比 1.0 の実験結果

3・7 データ処理

各アスペクト比の実験結果を次の手順で処理した。

- ① 電極間内外のポテンシャル差を評価するため、電極間内の面積と電極間外的面積を台形近似で算出した。その際電極間内の面積は、隣接する電極の影響を考慮するため図3・12に示すように電極の中心で2分し、中央よりの2つの面積の合計をもって電極間内の面積とした。ここで算出された面積はエネルギーに相当する。

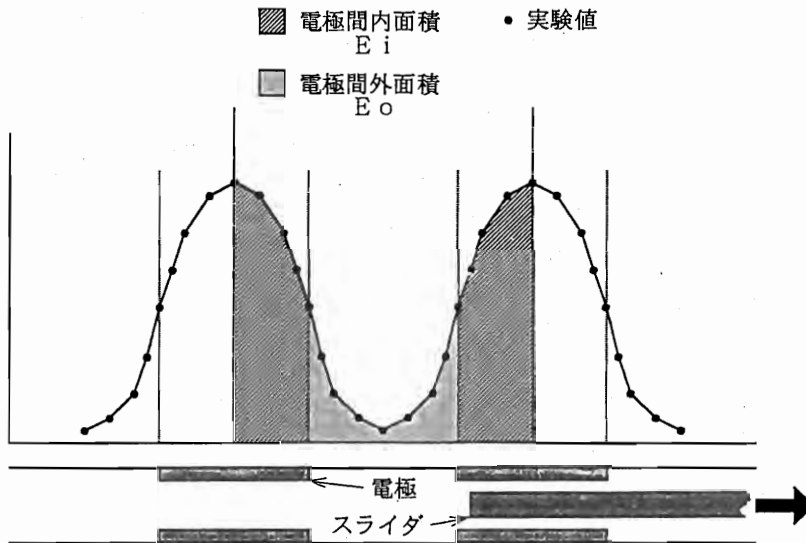


図3・12 電極間内外のエネルギー

- ② 得られた電極間内外のエネルギー比（電極間内÷電極間外）をアスペクト比ごとにプロットした。そのデータを $Y = a \cdot \exp(bX)$ で回帰した。その結果、

$$a = 3.763$$

$$b = -8.547 \times 10^{-2}$$

という結果が得られた。その様子を図 3・13 に示す。

- ③ ② で得られた数式を用いて各アスペクト比の単位体積当たりのエネルギー比を算出した。その結果を図 3・14 に示す。

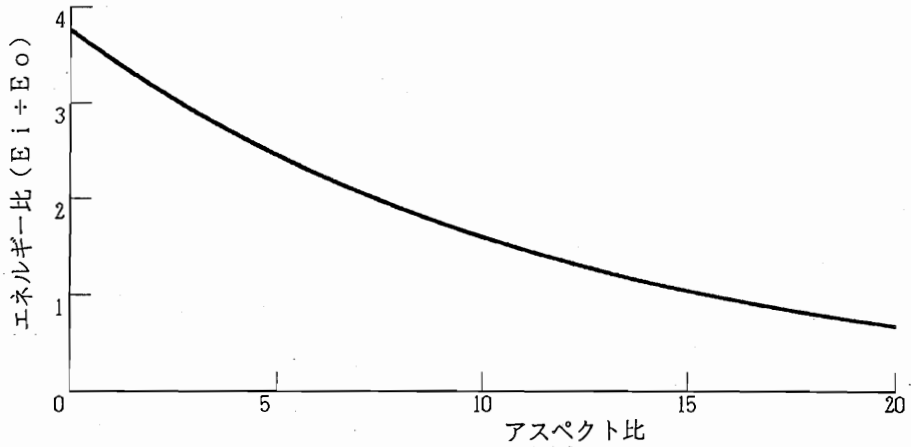


図 3・13 各アスペクト比に於ける電極間内外のエネルギー比

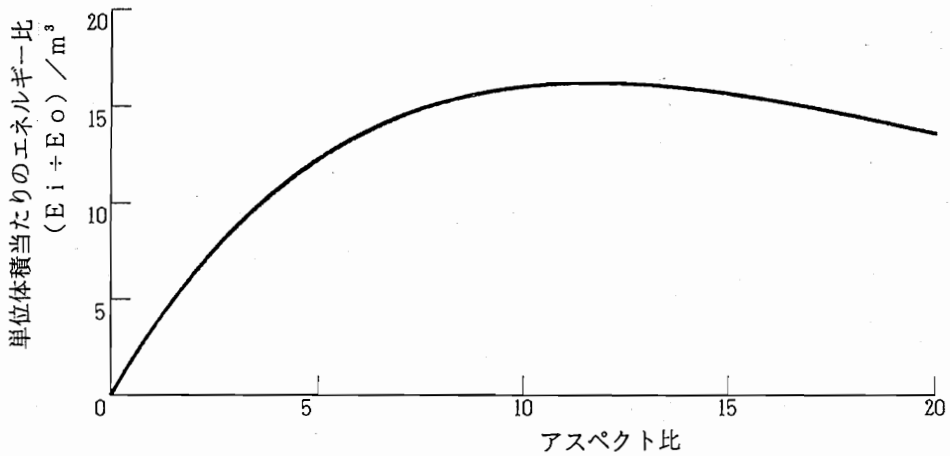


図 3・14 単位体積当たりのエネルギー比

3・8 3次元レベルの最適アスペクト比

図3・13に示した通り、電極間内外の単位体積当たりのエネルギー比はアスペクト比10付近で最高になる。これ以上集積化しても力密度は上昇せず返って下降する。このことは3・3節で述べた通り、実際の電極長さは短くしているにも関わらず、仮想的な電極長さが長くなり、やがては1つの長い電極と等価になっていく様子を表している。電極長さが長くなると、スライダがする仕事量は長さ按比例して大きくなるが、最適アスペクト比で集積化した素子のトータルでの仕事量を越えることはない。また先程述べたように力密度の点でも不利になるばかりでなく、スライダの変位量を制御することが非常に難しくなる(第6章参照)。よって、単位体積当たりのエネルギー密度が最高になるアスペクト比10付近で集積化するのが最も理想的と言える。

但し本年度は第2章で述べた通り、実験上の利便性や製作技術等の制約から、アスペクト比0.8を用いて多層集積化モデルを製作した。現状の加工技術からいって、これ以上スライダの溝長さMを短くするには多大なコストがかかるため、基礎データを収集するには性能面と併せて妥当なアスペクト比と言える。また、スライダの凸部長さ L_s と溝長さM、電極長さL、電極間長さPが全て等しい時に駆動効率が最高になる(5・2節参照)ことを受けて、本年度製作したモデルも $P = M = L = L_s$ の条件で加工した。つまりアスペクト比を10にするにも、ステータ側のL及び L_s と、スライダ側のPとMは全て同じスケールで加工しなければならない。現時点でステータ側はアスペクト比10に対応した加工が低コストで可能である。つまり裏を返せば、将来的にスライダ側の加工が手軽にできれば、アスペクト比を10に近づけることによって力密度を更に大きくできる可能性を有すると言える。

3・9 小括

ここではアスペクト比0.6から1.5まで、0.1刻みで10種類のアスペクト比のステータを製作し、推力係数を計測して電極間内外のエネルギー比を算出した。得られたデータをコンピュータで解析した結果、アスペクト比1.0付近で単位体積当たりの推力が最高になることが分かった。

本年度製作したアスペクト比0.8の多層集積化モデルは、実験上の利便性や加工製作上の制約から妥当であると言えるが、将来的にアスペクト比を1.0に近づけたモデルを製作した場合、更に力密度の大きな静電リニアアクチュエータ誕生の可能性が有ることが分かった。

第 4 章

推力測定試験

4・1 緒言

これまで述べてきた理論及び予備実験を踏まえ、平面方向に基本素子を20個集積化したものを5層組み合わせ、合計100個の基本素子を有する多層集積化モデルを製作した。ステータ、スライダは第2章で設計したのを用い、これ等に配線を施し組み上げた外寸は $44 \times 44 \times 8.82$ [mm]である。外寸のオーダーは拡大素子の領域を出ていないが多層集積化の有効性を確認するには差し障りはない。また昨年度までの拡大素子と比べ1電極当たりの体積がおよそ153分の1になった。

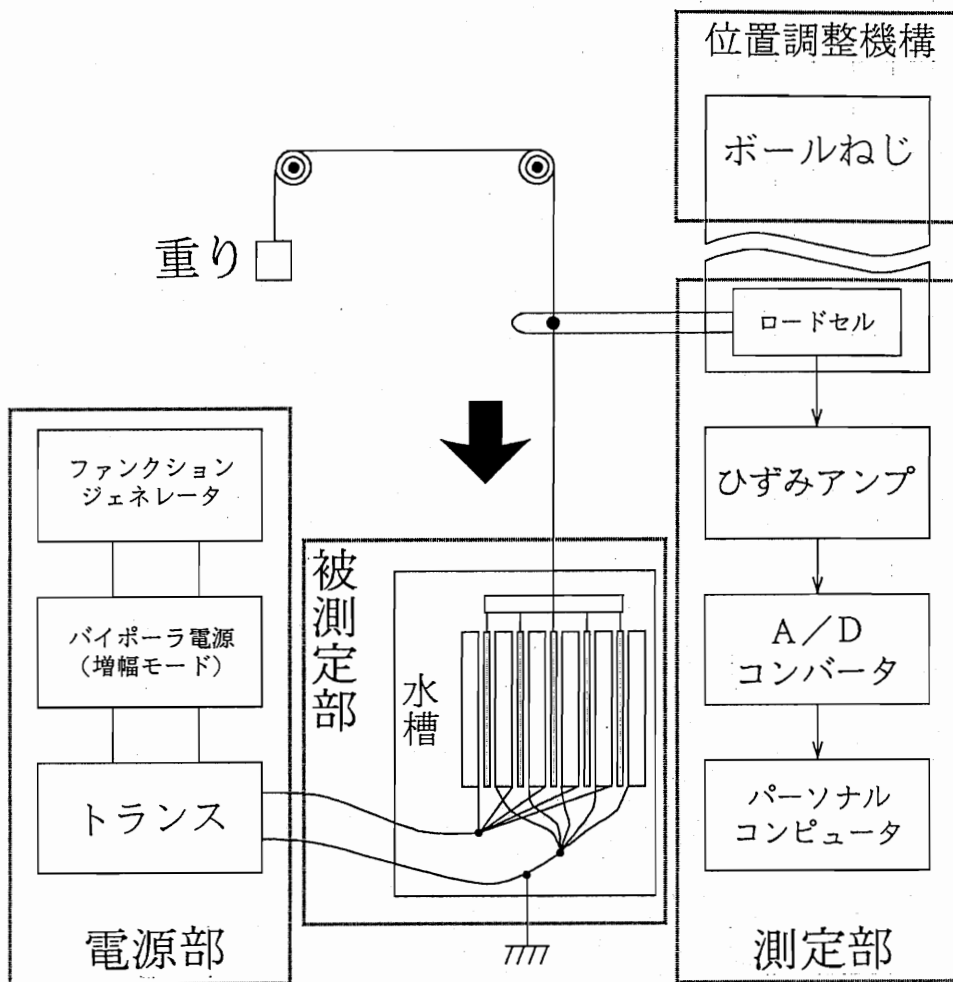
ここでは実際に電圧を印加して静推力を測定し、性能評価の一考察を行う。

4・2 実験装置

実験装置は電源部、被測定部（スライダ、電極、水槽等）、測定部（ロードセル、パーソナルコンピュータ等）、位置調整機構で構成される。また、測定する力が微小なため、外部からの振動を除去するよう除振台上に被測定部を設置した。図4・1に実験装置の外観と構成を示す。

4・2・1 電源部

素子に電圧を印加するための装置である。最大200 [V]、10 [kHz]の交流電圧を得るために、ファンクション・ジェネレータで振幅がほぼ10 [V]までの正弦波電圧を発生、



(2) 実験装置構成概略

図 4 ・ 1 静推力測定試験実験装置の外観と構成概略

バイポーラ電源（増幅モード）で振幅を約120[V]まで増幅し、更にトランス（1次：2次＝1：4）で昇圧して使用した。

4・2・2 被測定部

インピーダンス測定に用いたアクリル製の水槽に蒸留水を注入し、付録に示すスライダ、ステータを組み上げ配線を施して使用した。ギャップ充填剤は導電率 $1.2[\mu\text{S}\cdot\text{mS}/\text{cm}]$ で、素子が完全に水中に浸るまで注入した。また、5層からなるスライダの推力を損失なく均一に取り出すため、スライダの上部に金具を取付、ピアノ線を介して糸で釣り下げる形をとった。その様子を図4・2に示す。

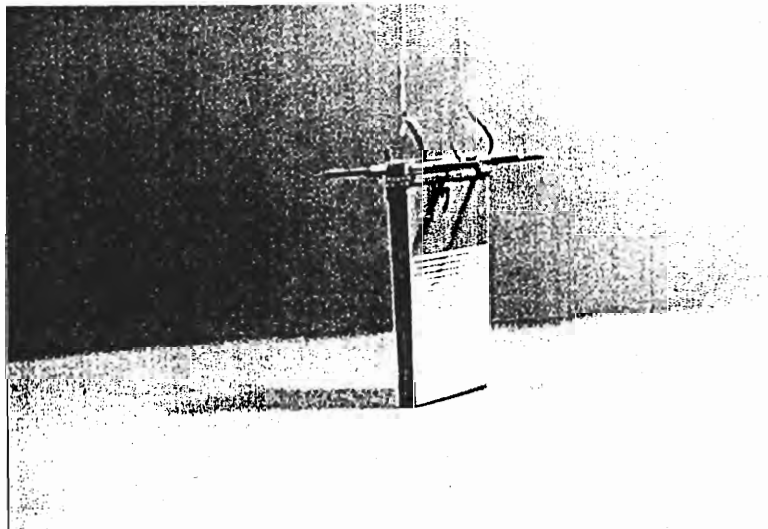
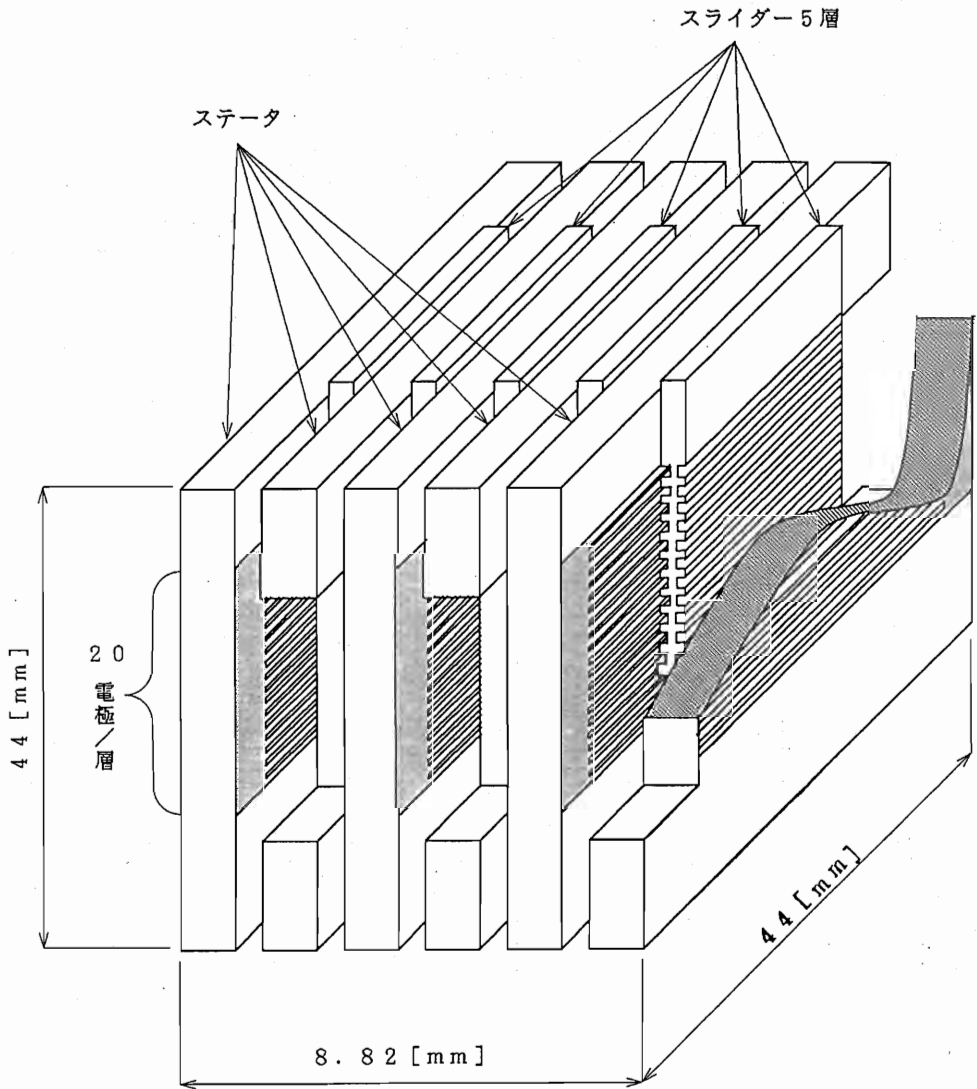


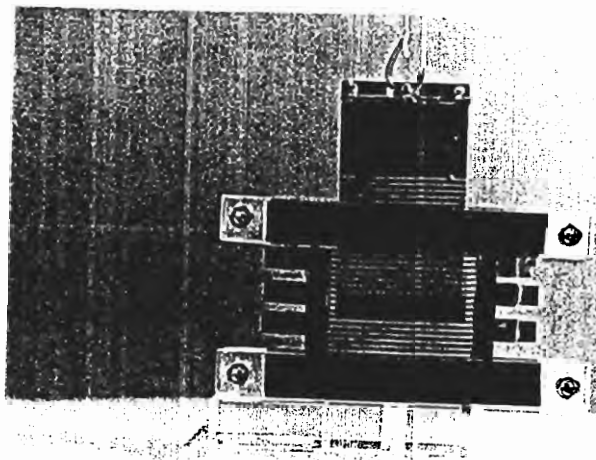
図 4・2 静推力測定用スライダ組み上げ外観

また、スライダをステータに装着した外寸は $44 \times 44 \times 8.82$ [mm] で、これがアクチュエータとしての大きさになる。
 図 4・3 に素子を組み立てた様子を示す。



(1) 組み上げ寸法

図 4・3 多層集積形モデルの外寸と外観 (その 1)



(2) 外 観

図 4 ・ 3 多層集積形モデルの外寸と外観 (その 2)

4 ・ 2 ・ 3 測 定 部

素子の静推力を測定するためにロードセル (荷重トランスデューサ) で静推力を電圧信号に変換し, これをひずみアンプで増幅した後, A / D コンバータ (12 ビット) を介してパーソナルコンピュータに取り込みデータ処理を行った. この測定系の最小分解能は $0.05 [mN]$ ⁶⁾ である.

4 ・ 2 ・ 4 位 置 調 整 機 構

位置調整機構は, 第 3 章 (インピーダンス測定試験) で用いたものと共通のものである.

本実験においては測定毎に, スライダの挿入量が常に 2 分の 1 電極 ($0.35 [mm]$) になるように調整した.

4・3 電圧特性確認試験

4・3・1 実験方法

図4・4に示すように、滑車を介してスライダを無負荷状態にしてからオフセットをとった。またこの実験ではスライダ1層のみを使用し、従って基本素子は20個集積化した状態で計測した。

印加する電圧は50, 100, 150, 200 [V]の4段階とし、基本素子の駆動状態が最も安定で損失係数の小さくなる周波数10 [kHz]の交流電圧を用いた。スライダは位置調整機構の最小分解能を考慮した上で、最も電極間内外の電位ポテンシャル差が最大となる2分の1電極, 0.35 [mm]挿入した状態を初期位置とした。駆動方向は摩擦の影響を最小限に抑えるため、鉛直下向きに設定した。その概念を図4・4に示す。

また、測定手順は次の通りである。

- ① ロードセルに1 [g]の重りを取付、ひずみアンプのレンジと感度を適当な値に調節し、1 [g]当たりの電圧信号を測定する。
- ② スライダを電極間に挿入し、ロードセルより下の荷重と同じ重りを滑車の反対側に取り付、ひずみアンプのバランス機能によりゼロ点調整を行う。
- ③ サンプリングインターバルは10 [mS]で、サンプリング時間は10 [S]とした。
- ④ サンプリング開始から数秒後に電圧を印加し、2～3秒間推力を発生させた後に電源を切る。電源を切ったからも10 [S]経過するまでサンプリングは行う。
- ⑤ 実験中はギャップ充填材の水溫及び導電率を監視する。

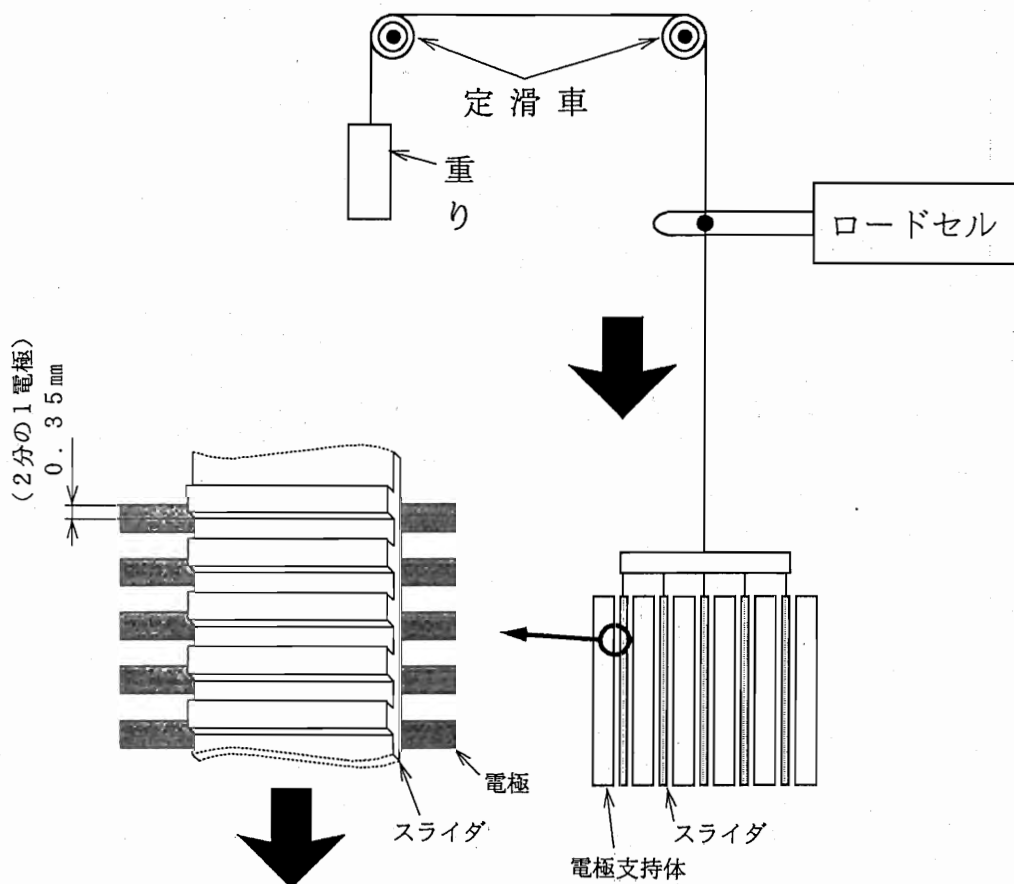


図 4 ・ 4 無負荷状態とスライダ位置

以上の手順で実験を行ったが、計測器に 0.5 [V] 程度の高周波電源ノイズが入ってくるため、関連機器は全て別々の電源から供給した。またハードフィルターを介し 100 [Hz] 以上の波形は除去してコンピュータに取り込んだ。

4・3・2 電圧特性試験実験結果

図4・5に電圧-推力特性曲線を示す。測定値を2次回帰した結果、

$$F_s = (1.154) V e^2 - (2.033 \times 10^{-2}) V e - 6.318 \times 10^{-3} \quad [mN]$$

(4・1)

という結果が得られた。図を見ると電圧の2乗に推力が比例していることが確認できる。後で触れるがこの結果は諸元を理想値とした理論値のほぼ40%に相当する。

また、電圧を150[V]付近に上げた頃から、スライダからの発信音が確認された。発信音は電圧を上げるに従い大きくなっていったので、確認のため250[V]付近まで電圧を上げてみたが耳障りになる程の音量ではなかった。

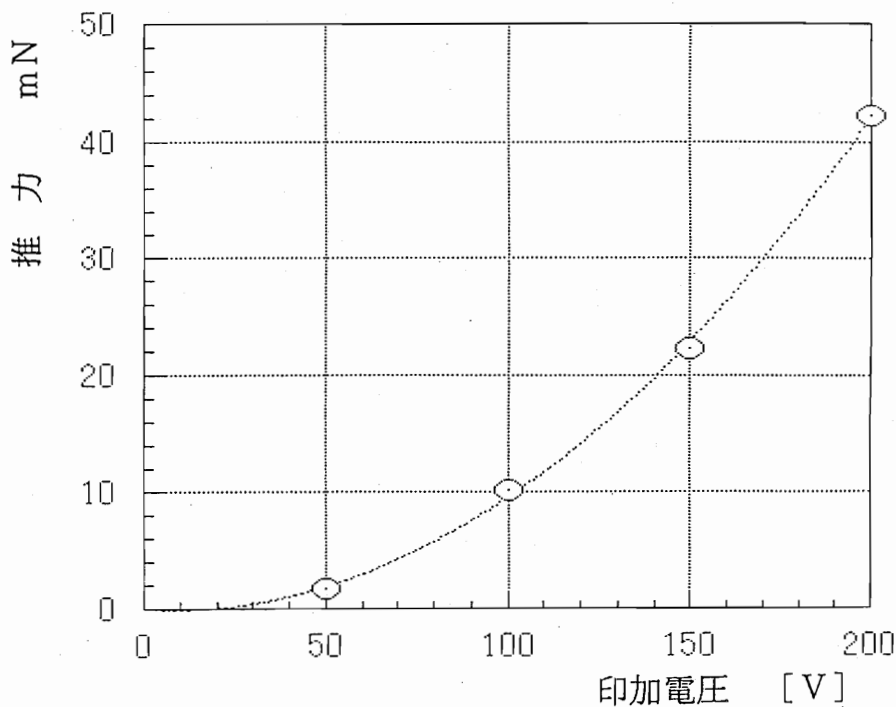


図4・5 電圧-推力特性曲線

4・4 積層化モデル推力測定試験

4・4・1 実験方法

基本的に4・3・1で述べた実験手順を踏襲する。但し、積層化の意義を確認するため、図4・6に示すようにスライダを1～5番まで番号順に1層ずつ計測器に加え、その都度推力を測定していった。

また、スライダを1枚ずつステータに装着して計測するのではなく、初めから5枚全て装着しておき、電圧は常に5層のスライダに印加し、ロードセルに推力を計測するスライダを1枚ずつ増やしていった。

尚、電圧は100[V]、10[kHz]の交流電圧を印加した。

4・4・2 積層化モデル実験結果

図4・7に実験結果を示す。一次回帰を行った結果、

$$F_s = 6.437 \times n - 0.4272 \quad [\text{mN}]$$

(但し n はスライダ枚数) (4・2)

という結果が得られた。図から分かるように積層化した層数に比例した推力が得られたことが分かる。これは諸元を理想値とした理論値のほぼ25%の推力が得られたことになる。

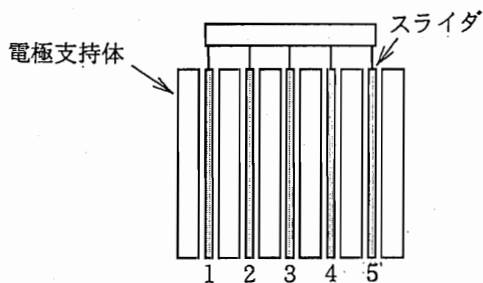


図4・6 積層化

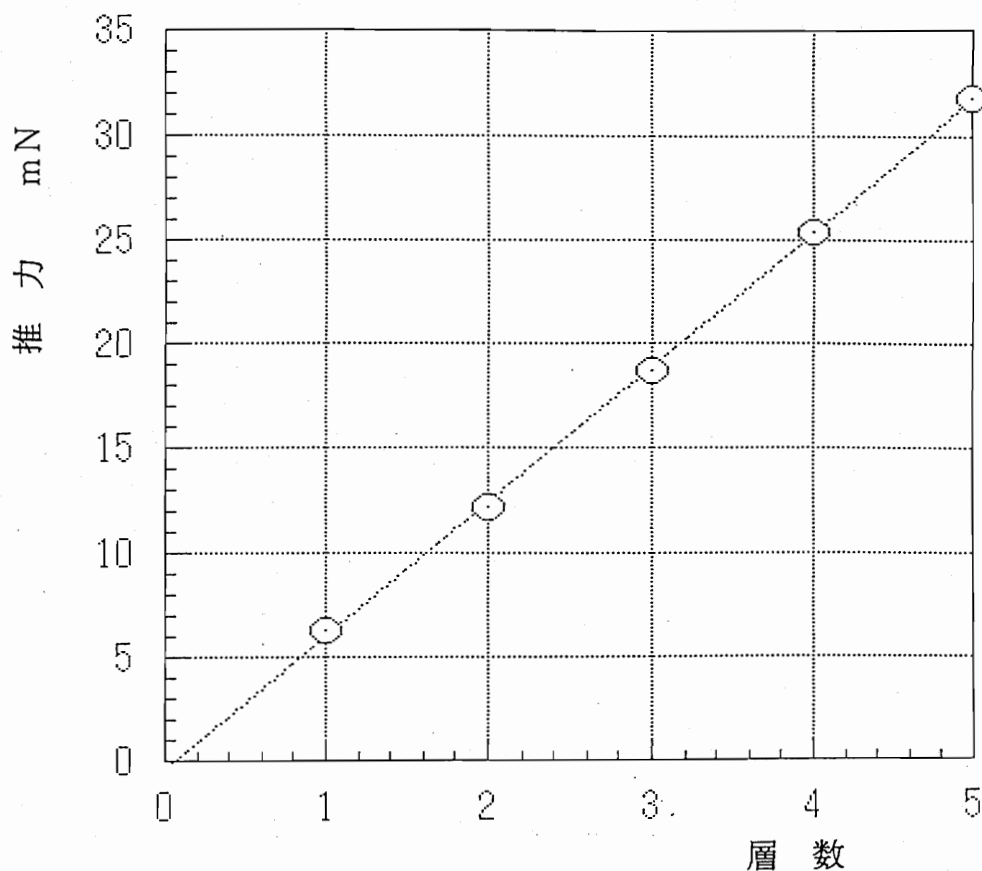


図 4・7 積層化モデル実験結果

また、5層積層化した状態で推力 31.85 [mN]、力密度 1865 [N/m³] 以上を発生し集積化の効果を確認できた。

4・5 考察

4・5・1 基本素子の等価モデル

今まで述べてきた理論式は図 4・8 (1) に示すようにスライダ、ギャップ、スライダがまだ挿入されていない空間の 3 種

類のコンデンサで構成されたものである。これを図に示すように順次等価変換していくと、(3)のように電極間の空間を1つのコンデンサとして捉えることができる。

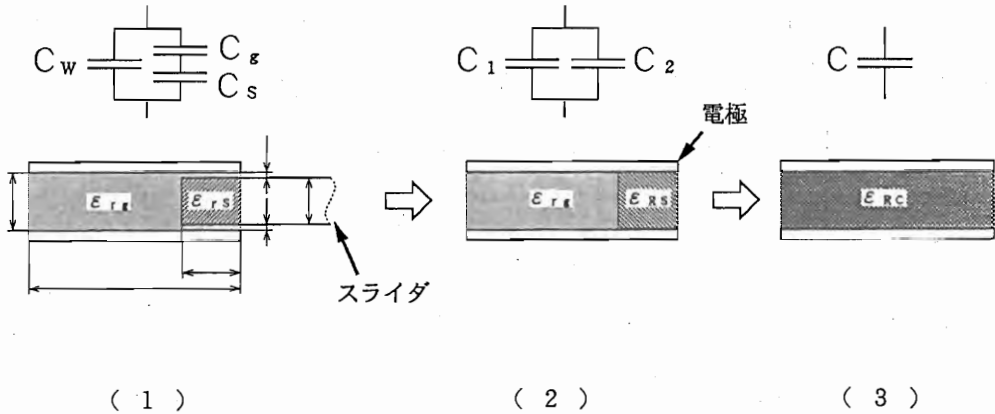
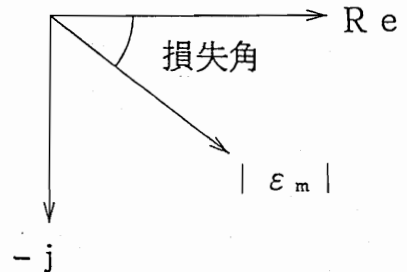


図 4・8 基本素子の等価変換

ϵ_{rg} , ϵ_{rs} を複素比誘電率として表すと,

$$\epsilon_{rg} = \epsilon_{mrg} \exp(-j\delta), \quad \epsilon_{rs} = \epsilon_{mrs} \exp(-j\beta) \quad (4 \cdot 3)$$

とおける。但し、 ϵ_{mrg} , ϵ_{mrs} はベクトルの大きさ、 δ 及び β は損失角である(図4・8参照)。これを用いて等価変換した ϵ_{rc} , C を表すと、



$$\epsilon_{RC} = \frac{\epsilon_{mrg} e^{-j\beta} (L - \chi) + \epsilon_{mRS} e^{-j\beta} \chi}{L} \equiv \epsilon_{mRC} e^{-j\alpha} \quad (4.4)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 W}{D} \{ \epsilon_{mrg} e^{-j\beta} L + (\epsilon_{mRS} e^{-j\beta} - \epsilon_{mrg} e^{-j\beta}) \chi \} \quad (4.5)$$

となる。

推力 F_s は、交流電圧 $V = V_m \exp(j\omega t)$ を印加するので、

$$\begin{aligned} F_s &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta C}{\delta \chi} \cdot V^2 \\ &= \frac{\epsilon_0 W V_m^2}{2D} (\epsilon_{mRS} e^{j(\omega t - \beta)} - \epsilon_{mrg} e^{j(\omega t - \delta)}) e^{j\omega t} \\ &= \frac{\epsilon_0 W V_m^2}{2D} \{ \epsilon_{mRS} \sin(\omega t - \beta) \sin \omega t - \epsilon_{mrg} \sin(\omega t - \delta) \sin \omega t \} \\ &= \frac{\epsilon_0 W V_m^2}{4D} \{ \epsilon_{mRS} \cos \beta - \epsilon_{mRS} \cos(2\omega t - \beta) \\ &\quad - \epsilon_{mrg} \cos \delta + \epsilon_{mrg} \cos(2\omega t - \delta) \} \quad (4.6) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $\cos(2\omega t - \beta)$ 及び $\cos(2\omega t - \delta)$ は時間平均をとると 0 となり、実行的な力には関与しない。従って実行推力 F_{se} は、

$$\begin{aligned} F_{se} &= \frac{\epsilon_0 W V_m^2}{4D} (\epsilon_{mRS} \cos \beta - \epsilon_{mrg} \cos \delta) \\ &= \frac{\epsilon_0 W V_e^2}{2D} (\epsilon_{mRS} \cos \beta - \epsilon_{mrg} \cos \delta) = \frac{\epsilon_0 (\epsilon'_{RS} - \epsilon'_{rg}) W V_e^2}{2} \quad (4.7) \end{aligned}$$

となる。但し、 $V_m = \sqrt{2} V_e$ で V_e は実効電圧、 ϵ'_{RS} と ϵ'_{rg} は複素比誘電率の実数部で比誘電率である。

4・5・2 理論値と実験値の比較

実験結果を見ると次の2点に注目できる。

- (a) 4・3・2及び4・4・2で述べたように実験値は理論値よりも小さな値をとっている。
- (b) しかも一層で電圧を印加した場合の回帰式(4・1)と5層全てに電圧を印加し、1層ずつ推力を計測していった回帰式(4・2)の間でも違いがみられる。

(b)は、ギャップ充填剤の導電率の違いによるもので、実験中の導電率を時間積分して平均値を求めてから推力に換算すると、100[V]に於ける両式の値はほぼ一致する。蒸留水を生産する純粹製造装置の能力は集塵フィルターの特性に大きく依存するため、実験に用いる蒸留水の導電率には注意する必要がある。また実験中もギャップ充填剤は空気中に触れる表面積が大きかったため、埃などを吸収し導電率は刻々と変化した。水温も電圧を印加するとジュール熱により上昇するため、温度に依存性がある導電率は微小ながら変化する。実験中は水温が1[°C]ほど変化するのが確認されているが、この程度では導電率に大した影響を与えず、従ってギャップ充填剤の比誘電率も微小な変化しかしない。このことから不純物による導電率の変動に注意を払えばよく、温度変化を抑えることよりも周囲の埃等を吸収しない実験環境が望まれ、今後改良の余地があると言える。

(a)はギャップ充填剤の比誘電率の実験値を代入しているにも関わらず、推力は理論値の半分も出ていない。一番大きな原因は寸法精度によるもので、スライダの厚さは計測点により最高50[μm]程の違いが見られた。10[μm]ギャップが変われば推力は1桁違ってくるため、今後スライダの加工

精度を高める方法を検討するか、別素材での試作も検討することが望まれる。

(a) に関するその他の付加的な原因として、式(4・7)に示した実行推力に関与する項 ε'_{rs} と ε'_{rg} が変動していることが考えられる。式(4・7)を見ると、 $\cos\beta$ 及び $\cos\delta$ はスライダを振動させる要素であり、実験中も電圧を上げるとスライダの振動による発信音が大きくなっていくことが確認された。この機械的な振動にギャップ充填剤がついていけなくなり、低めの振動をする可能性がある。この振動によりギャップ充填剤の電気的な性質が変化したと考えられる。

電気的な性質が変わる原因として以下の2通りの考えを挙げる。

(1) 電荷のリークによる特性変化

素子に電圧を印加する際スライダが振動し、スライダの一部が電極と接触する。接触したときに電極に充填された電荷の一部がスライダに移動し、厳密に一定電圧で駆動していないことが考えられる。

(2) 電気二重層による ε_{rc} の変動

一般に固体と電解質溶液とが接触すると、固体表面と溶液の化学的性質の違いによって、溶液中の正または負イオンの一方が固体表面に選択的に吸着される。本研究の場合ギャップ充填剤が完全な非電解質溶液でないため、プラス電極側には負イオンが多く吸着される。するとギャップ充填剤の拡散層は正に帯電し、ここに電気二重層が形成される。図4・9に界面電気二重層の電荷分布の様子を示す。

図4・10のように座標をとると、二重層電荷密度 ρ 及び電位分布 ϕ は近似的に次式で表すことができる。

$$\rho = \frac{\sigma_0}{\delta} \exp\left(-\frac{\psi}{\eta}\right) \quad [C/m^2] \quad (4.8)$$

$$\phi = \phi_0 \exp\left(-\frac{\psi}{\eta}\right) \quad [V] \quad (4.9)$$

ここで、 σ_0 、 ϕ_0 は $\psi = 0$ における面電荷密度及び電位である。 δ' は電気二重層の平均的な厚さで、デバイ長と呼ばれ、ギャップ充填剤の緩和時間 τ 及びイオンの拡散係数 Γ により次のように表される。

$$\delta' = \sqrt{\tau\Gamma} \quad [m] \quad (4.10)$$

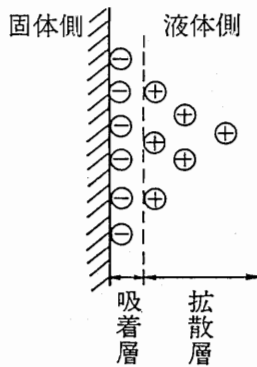


図 4.9 界面電気二重層⁷⁾

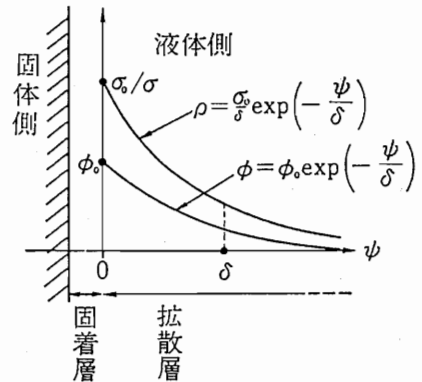


図 4.10 電位分布⁷⁾

電気二重層を電極間隔 δ のコンデンサとみなすと、図4.8の(1)で示した等価回路の他に、電源を入れてから出現するこの新たなコンデンサが推力に直接関与する要素として加わることになる。この電圧を加えることによってできた仮想コンデンサが推力の減少を招いていると考えられる。すなわち、図4.8における ϵ_{rc} が理論値と異なる状況が電圧印加とともに起っていると考えられる。この現象は推力を発生し得る空間の

特性そのものが変化したことを意味し、単に図4・8の(1)に示す素子のインピーダンスが増強された状態ではない。静電容量、比誘電率、損失係数はそれぞれ複雑な関係を持っており、単独で分けて考えることはでないことを指し示している。

またこのようにしてできた電気二重層も、先述のスライダの機械的な振動によってデバイ長が変化する。デバイ長が振動的に変わるということは、電気二重層のコンデンサ容量が変動するという他にない。

電圧を印加しない状態でも電気二重層は形成され得るが、電圧を印加したと同時に増強されることは間違いない。また上記のように機械的な振動によっても電氣的な特性が変わるため、推力係数のような静的な計測手法が正確に駆動状況を記述するとは言い切れない。今後、電界のでき方等がどう推力に影響を与えるか検討する必要がある。

4・6 小括

一層につき20個の基本素子を集積化したものを5層組み合わせ、合計100個の基本素子を有する外寸 $44 \times 44 \times 8.82$ [mm]のモデルを試作した。 100 [V], 10 [kHz]の交流電圧印加で、推力 31.85 [mN], 力密度 1865 [N/m³]以上を発生し集積化の効果を確認できた。

また、横方向に20個の素子を集積化したスライダ1層のみを用いた場合、 200 [V], 10 [kHz]の交流電圧印加で、推力 42.31 [mN], 力密度 8523 [N/m³]を発生した。これは 400 [V]の電圧を印加した際、 5.337×10^4 [N/m³]の力密度を有するアクチュエータとなり、これまでの静電気を利用したアクチュエータと比べ性能向上が認められた。

第 5 章

連続駆動

5・1 緒言

本研究で開発した多層集積形静電リニアアクチュエータは、基本素子1つ当たりの推力は小さく、微小な基本素子を幾つも集積化することによって実用的な推力が得られる。基本素子が微小であるということは、それだけ1回の電圧印加で得られるストロークが小さくなる。よって、可動子であるスライダの変位量を大きくするには、連続的に電圧を印加して微小なストロークを積み重ねる必要がある。

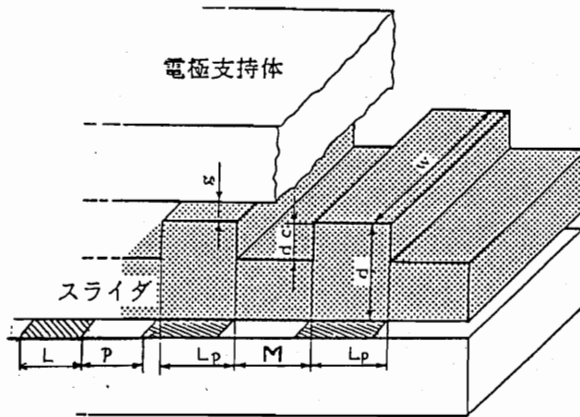
ここではスイッチングの方法を考案し、連続駆動をするための素子の設計をする。また、提唱したモデルを実際に製作し、連続駆動の動作確認をする。

5・2 連続駆動をするための電極配置

図2・11に示した通り、溝入りスライダを用いた場合は溝部が低誘電体の役割を果たし、相対的に凸部が高誘電体となりスライダ全体が電極間に引き込まれる。つまり少なくともスライダには平面方向に集積化する数だけ溝を彫らなくては集積化する意味がなくなる。

そこで溝長さについて考えてみる。図5・1に示すように、電極間長さ P とスライダ凸部の長さ L 、及び電極長さ L が全て等しいときに、基本素子の単位長さ当たりの仕事量は最大になる。これを受けて溝長さ M もスライダ凸部長さ L と等しくなる。

すなわち、溝入りスライダを用いた場合、基本素子の仕事が



$M = L = L_p = M$ の時
単位長さ当たりの仕事は最高

図 5・1 溝入りスライダを用いたモデル

できるは空間は、単位体積当たり最高で2分の1となる。また、溝入りスライダに限らず何らかの方法で高誘電体空間と低誘電体空間を作りだしたスライダを利用する場合は、全て単位長さ当たり2分の1しか仕事をし得ない。

このことより、 $L = L_s = P = M$ の条件で連続駆動が可能になれば、電圧印加時の仕事の効率は単位長さ当たり常に最高値で駆動できることになる。但し、2・4節で述べたように実際には端効果の影響を無視し得ないため、できる限り電極間内外のポテンシャル差を大きく保った状態での連続駆動が望まれる。つまり、電極群がスライダの移動とともにポテンシャル差最高の位置へ移動し続けるのが好ましい。これは、上記の単位長さ当たりの仕事量が最高になる条件を考慮に入れると、電極の移動によりスライダも同じ量だけ変位することに相当する。この概念を図5・2に示す。

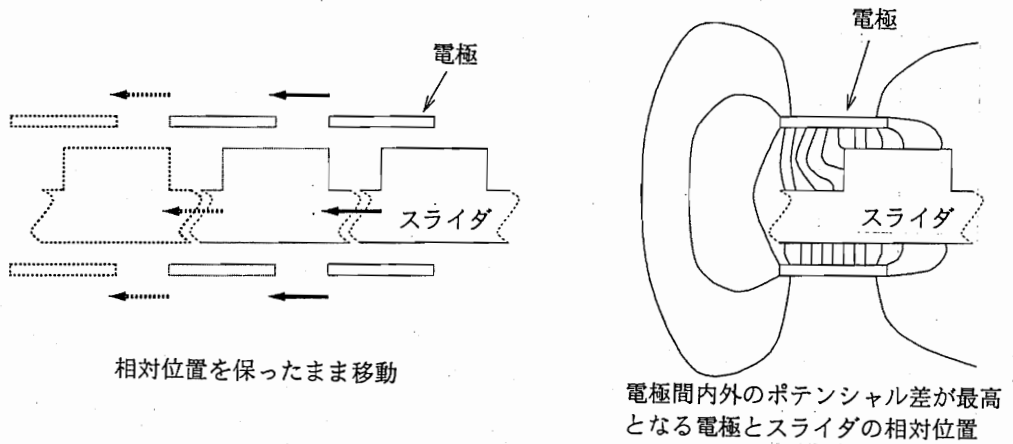


図 5 ・ 2 ポテンシャル差最高の位置のままの駆動

5 ・ 3 連続駆動モデル

本年度は平面方向に集積化したモデルを用いて連続駆動の動作確認を行った。その動作原理は 2 ・ 1 で述べた通り、ステータ内で電極を移動させスライダを引っ張り続ける形式を用いた。現実には電極を移動させることは非合理的であるので、仮想的に電極を移動させる方法を考案した。まず図 5 ・ 3 の (1) に示す 4 通りの電極群を対面で互い違いに配置させることを考える。この 4 通りの電極群の電極長さ L はいずれもスライダ凸部長さ L_s と等しいものとし、1 種類の電極群にのみ電圧を印加することが可能であるとする。

まず図 5 ・ 3 の (1) に示す状態をスライダ凸部と電極群の相対位置の初期状態とし、この状態で B の電極群に電圧を印加する。この際 B の電極群の対面に、図 5 ・ 3 の (2) に点線で示すようなグランド用の電極群が出現するものとする。すると初期位置にあったスライダは、B の電極群により (2) の状態

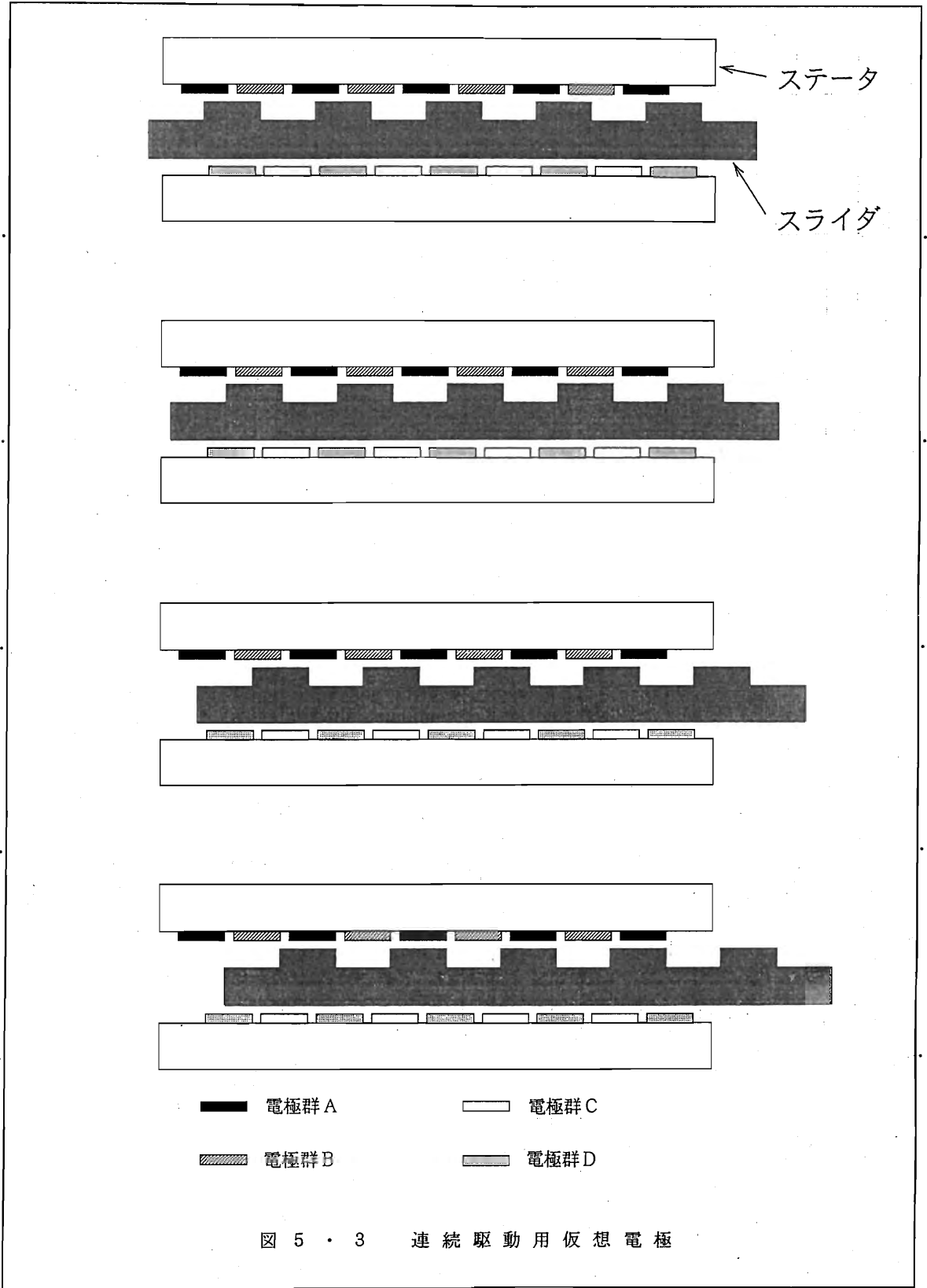


図 5 ・ 3 連続駆動用仮想電極

まで引き込まれる。

次に電極群 C に電圧を印加する。この際先程と同様に、C の電極群の対面にグランド用の電極群が出現するものとする。これにより、(2) の状態にあったスライダは電極群 C に引き込まれ(3) の状態になるまで移動する。

更に電極群 A の対面にもグランド用の電極群を出現させ、これに電圧を印加する。状態(3) にあったスライダは状態(4) の位置まで移動して止まる。

続いて電極群 D の対面にもグランド用の電極群を出現させ電圧を印加する。状態(4) の位置で静止していたスライダの凸部は、電極群 D に対して(1) の初期位置と同様な相対位置まで移動する。(実際には、スライダの凸部が電極長さの2倍分だけ右に移動したことになる。)

この一連の操作を行うことにより、スライダは見かけ上2分の1電極つつ右に移動する。では、実際に電極をどのように配置し、グランド用の電極群を電圧を印加する電極群の対面に出現させる方法を考えてみる。

図5・4に電極群の詳細を示す。図に示すようにAからDの電極群は実際には2つの同じ長さの電極で構成され、対面の電極群とは実質的に互い違いには配置されていない。まずAの電極群に印加する場合、aとbの電極群に印加する形となる。これと同時にhとeの電極群を接地し、スライダの凸部を電極群Aの空間へと導く。

Bの電極群に電圧印加する場合、c、dの電極群を同時に印加してやり、f、gの電極群を接地してやる。以下同様にして、電圧を印加する電極群の向かい側にある電極を接地するようになれば、図5・3に示した連続駆動が可能になる。表5・1に印加する電極群の組み合わせを示す。

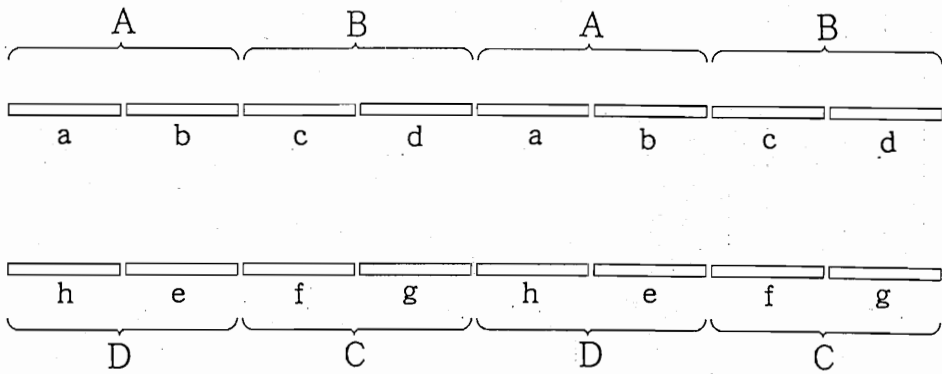


図 5 ・ 4 電極群の詳細

表 5 ・ 1 電極群のスイッチング組み合わせ

| 仮想電極群 | 実質電極群 | 接地電極群 |
|-------|-------|-------|
| A | a, b | h, e |
| B | c, d | f, g |
| C | g, h | d, a |
| D | e, f | b, c |

以上のようなスイッチングを可能にするため、2回路4端子のスイッチングボックスを製作した。その外観を図5・5に示す。また、電極群を設置したステータを図5・6に示す。このステータも2章で述べた多層集積化モデルと同様に、石英を素材に用いており、電極はITOを蒸着させたものである。付録にステータの図面を示す。

スライダも溝入りスライダを用い、材質、加工方法とも多層集積化モデルと同じものを用いた。既に述べた通りインピーダンス測定と同じスライダを使用した。



図 5 ・ 5 スイッチボックス外観

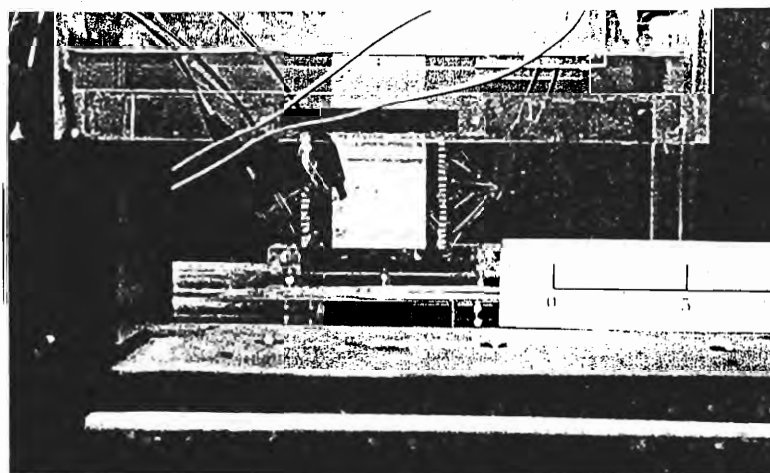


図 5 ・ 6 連続駆動用ステータ外観

5・4 連続駆動動作確認実験

5・4・1 実験装置

図5・7に実験装置の外観を示す。また、図5・8に実験装置の構成を示す。基本的に多層集積化モデルの静推力測定試験と同様の電源構成で、これにスイッチングボックスを加えた形となる。

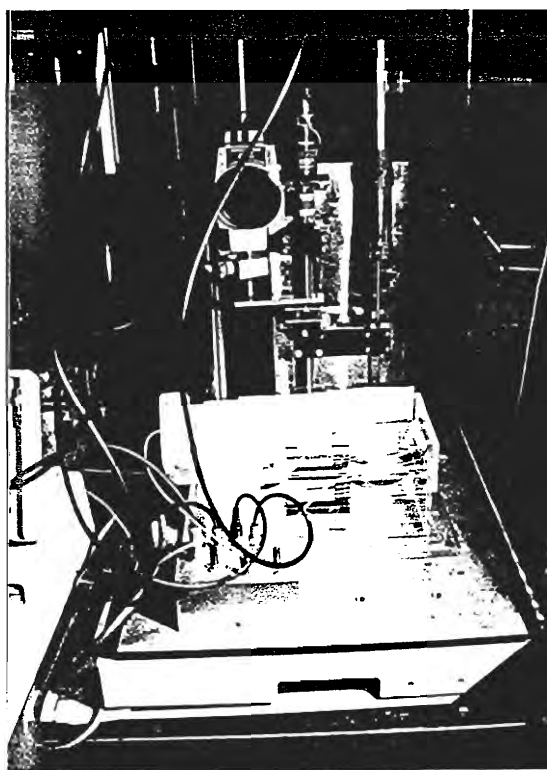


図5・7 連続駆動実験装置の外観

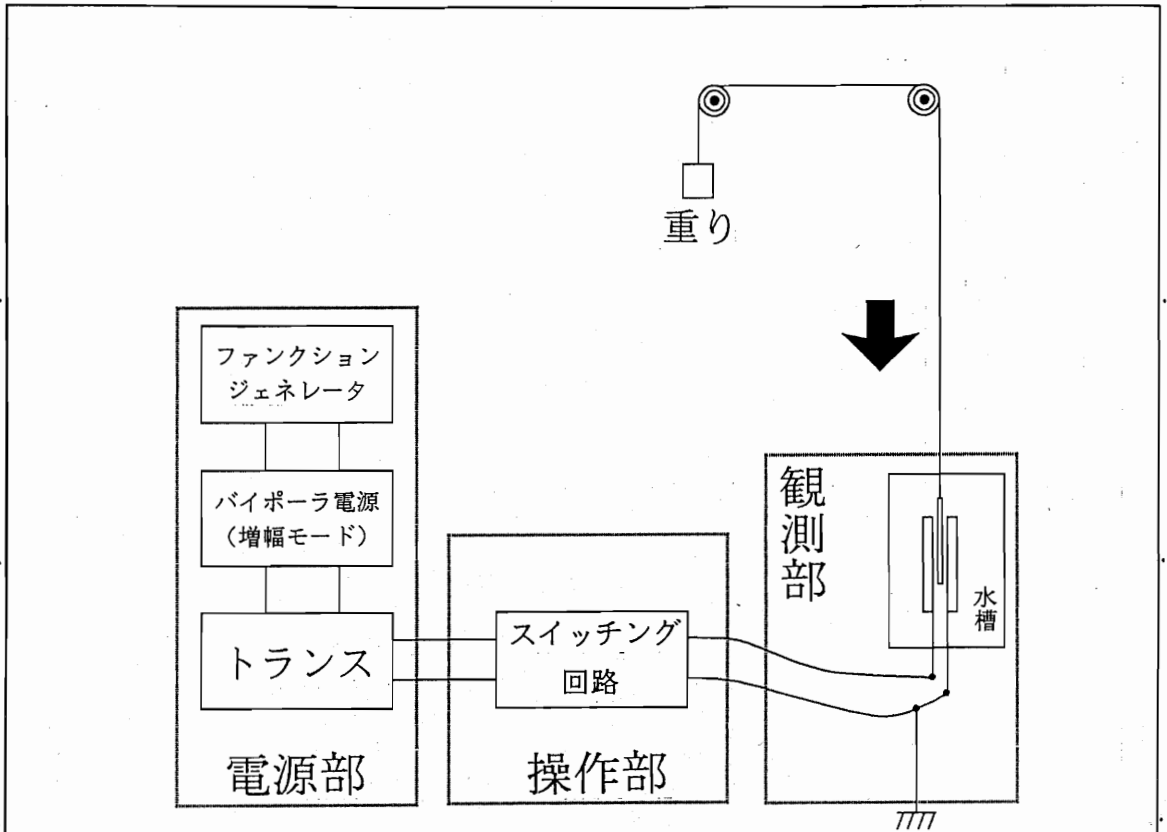


図 5 ・ 8 連続駆動実験装置構成

5 ・ 4 ・ 2 実験結果

スイッチボックスからの操作により、スライダは 1 ピッチ 0.25 [mm] のリニアな連続駆動を確認できた。

また、スイッチングの早さを変えると、それに応じてスライダの移動速度も変わることも確認できた。

本研究で製作した、可動素子が電極に挟まれたサンドイッチ構造を持つ静電リニアアクチュエータは、単に電圧を印加しただけでは微小変位をするだけで、回転角を出力とするサーボモータのように無定位なシステムではない。可動素子であるスライダは一回の電圧入力に対し、電極から電極までの移動しかしない。図 5 ・ 9 に第 4 章で計測した推力波形の一例を示す。図

を見ると時定数が小さいことも確認でき、負荷がない場合は変位を任意に取り出せると言うて良い。

但し、将来的に本格的な連続駆動をするような場合、負荷が加わると今の機構をそのまま小形化、自動化しただけでは力一定駆動は難しく、滑らかな動きをするのも難しい。今後、単なる駆動理論の確認や動作確認といった領域を脱した、制御方法や性能向上を睨んだ研究姿勢が必要であると言える。

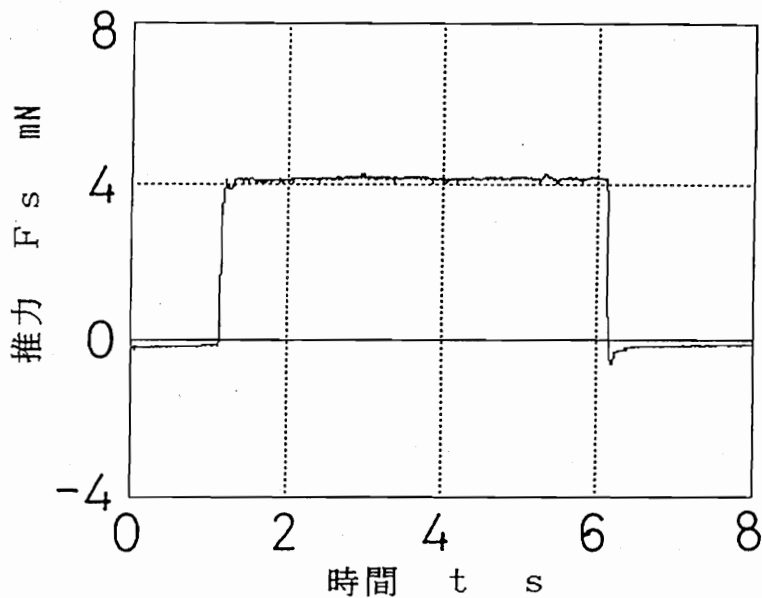


図 5・9 推力サンプリング波形

5・5 小括

スイッチボックスからの操作により、可動子であるスライダは2分の1電極に相当する、1ピッチ0.25 [mm]のリニアな連続駆動を確認できた。

また、スイッチングの早さを変えると、それに応じてスライダの移動速度も変わることも確認できた。

スライダは一回の電圧入力に対し、電極から電極までの移動

しかせず、定位性が有ることも確認できた。つまり、負荷がない場合は変位を任意に取り出せると言って良い。但し、将来的には負荷を含めた外乱の影響を考慮して、この制御系を基に改良することが望まれる。

第 6 章

駆動方式の検討

6・1 緒言

マイクロメカトロニクス分野では1つ当たりのアクチュエータが非常に小さいため、単位体積当たりの出力が上がっても集積化しないと大出力は望めない。将来を担うアクチュエータの開発は、集積化とそれに伴う出力制御の方法の確立が必要不可欠である。これまでの制御の概念で捉えると、制御部に各々のアクチュエータからの配線が集中し、管理しきれなくなることが予想される。制御部はできるだけ少ない情報で状況を判断し、今までと同等かそれに近い制御を行うことが強いられる。

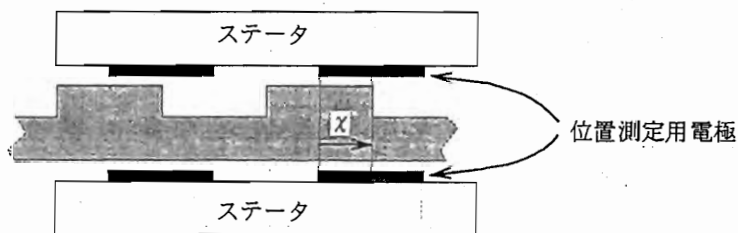
普通の機械制御回路、開ループシーケンス動作の大部分はリレー接触器と静的要素、タイミング装置等で構成される。複雑な制御システムは煩雑さを同時に抱え込むばかりでなく、非信頼性も指数関数的に増大させるので、これまでの1対1の莫大な配線を要する制御の概念は合理的であるとは言えない。できるだけ少ない配線でコントロールするということは、制御部に取り込める変数がそれだけ少なくなるということである。ここではその一手法を提唱する。

また、その制御方法を利用して、駆動条件の方針変更に伴い、制御系の性能は随時把握しておく必要がある。例えば、変位量制御から力制御に切り替えたりする場合や、同じ力制御でも外乱の加わり方が変われば入力信号は違う形に変わる。本章では力制御を中心に、駆動方式についての一考察を行う。

6・2 各基本素子からの配線の削減方法

本研究の静電アクチュエータは制御対象としてみた場合、原理的に端効果等の非線形要素が入ってくるため、スライダの移動につれて印加電圧等の駆動条件は最適値が異なってくる。制御対象の特性が時々刻々と変化していく場合、なるべく早い時間内にその特性変化を知る必要がある。将来的に集積化モデルの動作を平滑にするためには、各スライダの凸部と電極の相対位置を変数にした適応制御が望まれる。本年度はその足がかりとして、平面方向に集積化したモデルのスライダの位置検出方法を考案した。

平面方向の集積化で単位体積当たりの発生推力が最も大きい場合は図5・1に示した通りである。電極長さと電極間長さ、スライダ凸部、溝長さの全てが等しい場合が平面方向の集積化に最も適している。その場合、図6・1に示すように1つの電極とスライダ凸部の相対位置が分かれば、隣接する電極とスライダ凸部の相対位置も同じ状態にあることが分かる。つまり、1対の電極間で囲まれた基本素子1つの情報が分かれば、横方向全てに渡っての情報が得られたことになる。

図6・1 相対変位 x

電極とスライダの相対位置を得るために、1対の電極で計測

できる空間の静電容量の変化を利用する。例えば図6・2に示す空間Aの情報、空間Bの情報と同様であることを利用する。静電容量の変化から相対位置を検出する方法は以下の手順によって行う。

- ① 図6・1に示す1対の電極に測定用の微小信号を流し、空間Aに一定電圧をかける。
- ② スライダの凸部が電極間に引き込まれるに従って空間Aの静電容量は増大する。
- ③ 静電容量の増加に伴い信号電流が変化するのでこれを計測する。
- ④ 予め分かっている電流とスライダの位置関係と対比し、横方向のスライダの移動量、及び電極とスライダの相対位置を得る。

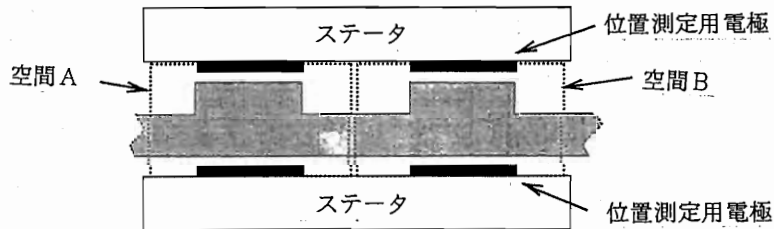


図6・2 位置測定電極の計測範囲空間

この方法で平面方向の情報が得られたとすると、多層集積化モデルも全て同位相で駆動すれば扱いは極めて簡単になる。1つの基本素子の情報さえ確認できれば、立体的に数百電極集積化しても全ての基本素子は同じ動きをしているので、制御部は配線の混乱や離散的な要素を抱え込むことなく駆動条件の指示が出せる。上記の静電容量の変化を利用して位置を検出する方法は一つの例でしかないが、その他の方法でも1つの基本素子

の情報さえ得られれば、多層集積化モデルの扱いも計測した基本素子と同じようにすれば良いことに変わりはない。従って電源部からの配線は、プラスとグラウンドの2本あれば、1ストロークスライダを移動させるには必要かつ十分であると言える。

6・3 モデル式

アクチュエータとして実際に得られる実行推力は、図6・3に示すようにスライダが移動しようとする推力（便宜上、理論発生推力と呼ぶことにする）から摩擦、抵抗、スライダの慣性を引いたものになる。このうち抵抗成分は摩擦に含まれるものとする。

$$F_e = f_s - f_r - m\alpha \quad (6 \cdot 1)$$

が成り立つ。ここで各項の意味は次の通りである。

- ・ f_s : 理論発生推力 $f_s = (f_k V^2) \div 2$
 f_k は推力係数
- ・ f_r : 摩擦 $f_r = k_1 \cdot v + k_2 \cdot v^2$ と近似
 v はスライダの移動速度
- ・ $m\alpha$: 慣性 m はスライダ質量
 α はスライダの加速度

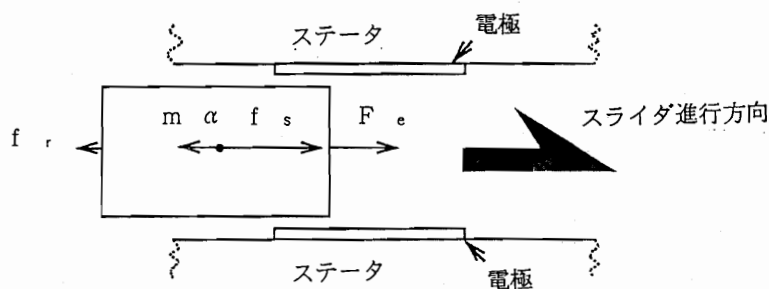


図 6・3 モデル式のベクトル関係

6・3・1 モデル式の応用例

最適な条件で駆動するための入力電圧を、このモデル式を用いて検討することができる。例えば、将来的にコンピュータを用いる等して、力駆動をリアルタイムで行うこともできる。以下にその手法について述べる。

(1) f_s について

挿入量の関数として扱い、推力係数を計測して用いる。挿入量 x が分かれば、予め計測してある図 3・1・2 のようなグラフを用いて推力係数を得ることができる。推力係数が分かれば、適当な電圧を掛けることにより式 (6・1) の右辺を左辺に等しくする f_s が得られる。

(2) f_r について

形式的には摩擦力であるが抵抗力も含むものとし、速度の関数として扱う。

$$f_r = k_1 \cdot v + k_2 \cdot v^2 \quad (6 \cdot 2)$$

に於ける係数 k_1 及び k_2 は以下の実験によって求められる。

(a) DCサーボモータにより、ステータに挟まれたスライダを一定速度で鉛直方向に引き上げる。

(b) 速度が一定したところでスライダを引き上げるのに要する力を計測し、 f_r とする。

(c) 速度を変えて (a)、(b) を繰り返す。 f_r 、 v を上式に代入し連立方程式を解いて k_1 及び k_2 を得る。

(3) 挿入量 x 、スライダ速度 v 、加速度 a について

式 (6・1) で実行推力を得るには、距離と速度及び加速度が必要である。推力係数 f_x は x の関数であるが x と線形な関係がないため、通常の2階線形微分方程式のように簡単に解が求められない。このため以下の手順で速度、加速度を求め、挿入量 x と時間 t との対応関係をとることにする。

- (a) $t = 0$ に於ける初期条件は $\alpha = (f_s - F_e) \div m$ であり, $v = \alpha \cdot \delta t$ が求まる.
- (b) 同様に $x = 0.5 \cdot \alpha \cdot \delta t^2$ として挿入量 x と時間 t との対応関係を得る.
- (c) 以後, 適当な δt をとり, 求まった v と x を逐次式 (6 . 2) に代入していくことにより, 任意の時刻 t に於けるスライダの実行推力と挿入量をシュミレートすることができる.

上記の方法で式 (6 . 1) が成立するような駆動電圧が計算でき, 力の電圧制御ができる.

6 . 4 力制御

6 . 4 . 1 推力係数の取扱いについて

実行推力 F_e を一定とする力一定駆動について考えてみる. 式 (6 . 1) において, f_r , $m\alpha$ はそれぞれ $\delta x / \delta t$, $\delta^2 x / \delta t^2$ の関数であるので, 入力信号 V^2 とはスライダが動き始めてから直接的な関係を持つようになる. f_x は図 3 . 1 2 に示した通りスライダが動いていてもいなくてもスライダと電極の相対位置によって力を発生させる要因となり得る. そこで, 力一定駆動を行う場合, f_x の扱いに注意しなければならない.

ここでは第 5 章で述べた連続駆動に対応する f_x について考える. 図 6 . 4 に連続駆動を行った場合の推力係数と電極の位置関係を示す.

図に示すように f_x はスライダの位置によって変動せず, トータルでは最初に電圧を印加したときからステップ入力を加え続けているのと変わらない. これは, 図 6 . 5 に示すようにスライダの長さがトータルの電極長さより長い場合は, スライダ端部が電極端部を通過しない間は $f_x = \text{const}$ で変わらない.

以下、特に断らなければこの条件で話しを進める。

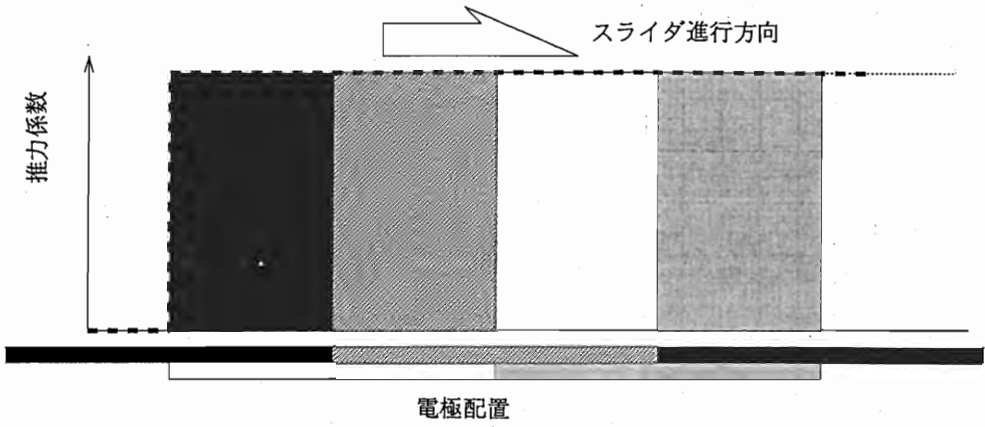
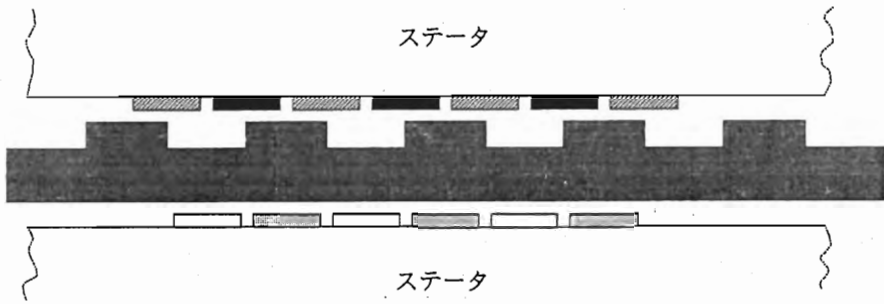


図 6 ・ 4 連続駆動を行ったときの推力係数



トータルの電極長さ+2×L<スライダ長さ

図 6 ・ 5 $f_k = \text{const.}$ の条件

6 ・ 4 ・ 2 モデル式を用いたスライダの変位量

初期値と $(\delta x / \delta t)^2 < 0$ を 0 とおいて式 (6 ・ 1) をラ

プラス変換し、 $\mathcal{L}[x] = X(s)$ について解くと次のようになる。

$V^2 = r$ とすると

$$\begin{aligned} X(s) &= \frac{f e^{-\frac{r f_k}{2}}}{s^2 (m s + k_1)} \\ &= \frac{A}{s^2} + \frac{B}{s} + \frac{C}{m s + k_1} \end{aligned}$$

ここで、

$$A = \frac{2f e^{-r f_k}}{2k_1} \quad B = \frac{-m(2f e^{-r f_k})}{2k_1^2} \quad C = \frac{m(2f e^{-r f_k})}{2k_1^2}$$

である。これをラプラス逆変換すると

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{m(2f e^{-r f_k})}{2k_1^2} \cdot \exp\left(\frac{-k_1}{m} t\right) \\ &\quad + \frac{2f e^{-r f_k}}{2k_1} \cdot t - \frac{m(2f e^{-r f_k})}{2k_1^2} \end{aligned}$$

(6 · 4)

となる。第1項は過渡項であり減衰する。第2及び第3項は定常項である。

6 · 4 · 3 出力を変位量としたときの伝達関数

入力を $V^2 = r$ 、出力を $x(t)$ としたときの伝達関数は、

$$G(s) = \frac{X(s)}{R(s)} = \frac{\frac{1}{r} \cdot f e^{-\frac{f_k}{2}}}{s^2 (m s + k_1)}$$

(6 · 5)

となり、積分要素が2つ入っていることが分かる。つまり偏差

を 0 にするには望ましいが、不安定であることが一目で分かる。特性方程式は、

$$m s^3 + k_1 s^2 = 0 \quad (6 \cdot 6)$$

で、ラウスの安定判別によっても不安定であることが確認できる。

一般に変位量を出力とするモータは力制御が難しく、逆に力一定駆動をする場合は変位制御は犠牲になる。本研究の静電リニアアクチュエータは、簡単な機構で力一定制御ができることに特徴がある。滑らかな動作はできないことが明かであるが、ステッピングモータ等と同様に分解能をできるだけ小さくとり、巨視的に滑らかな連続駆動をすることは可能である。

6・4・4 負荷を考慮した場合の力一定駆動

負荷を与えたときの力一定駆動について考える。式(6・1)に於ける慣性、摩擦、抵抗は後で考えるとして、誘電分極より早い応答を要求しないなら、理論的に入力($V^2 = r$)に比例した出力(F_e)が得られる。比例定数は $0.5 \times f_k$ である。この系にスライダの位置検出機構、負荷(外乱)を加えたブロック線図を図6・6に示す。

尚、スライダの慣性、摩擦、抵抗成分は外乱に含まれるものとして考える。

出力は、

$$F_e(s) = \frac{Rf_k - DU}{1 - (Rf_k - DU)e^{-sa}} \quad (6 \cdot 7)$$

よって伝達関数は、

$$G(s) = \frac{1}{R} \cdot \frac{Rf_k - DU}{1 - (Rf_k - DU)e^{-sa}}$$

(6 ・ 8)

となる。

次にブロック線図を等価変換し、一巡伝達関数を求めると、

$$GH = \frac{1}{R} \cdot \frac{DU - Rf_k}{1 + (DU - Rf_k) e^{-sa}}$$

(6 ・ 9)

となる。

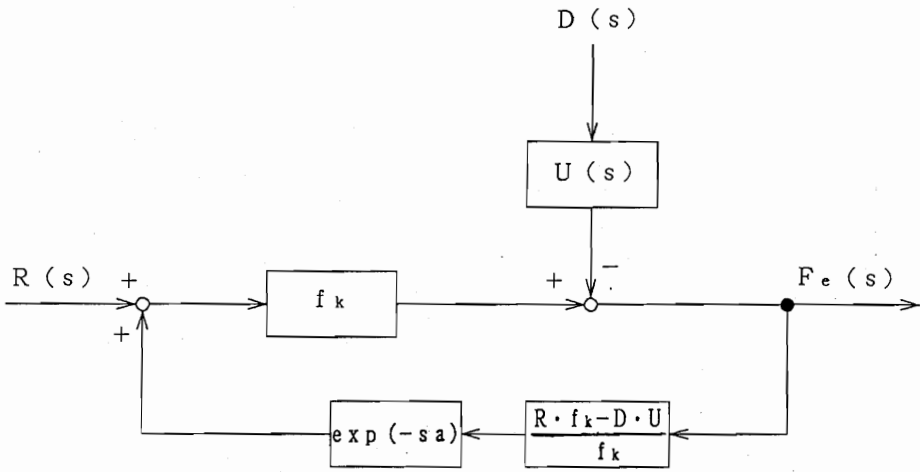


図 6 ・ 6 負荷を考慮した場合のブロック線図

6 ・ 5 伝達関数

通常、伝達関数には入力信号が関与せず、従って複素領域ではその他の要素を記述する式を代入することによって、一般的な時間領域の話ができる。しかし、式(6・7)を見ると、入力信号の絶対値 $R(s)$ が入っていることが分かる。これに

より、一巡伝達関数にも $R(s)$ が関与してくる。つまり、何らかの考察を行う場合、入力信号 $R(s)$ についてもその都度条件を変えて、具体的な周波数伝達関数を求めてやる必要がある。

ここではその一例として次の場合を考えた。

(a) 入力信号

- ① ステップ入力
- ② インパルス入力
- ③ 定加速度入力

(b) 外乱

- ① ステップ入力
- ② 単位インパルス入力
- ③ ランプ入力

④ $\begin{cases} 0 \cdots 0 < t < \alpha & (\text{図 6} \cdot 7 \text{ 参照}) \\ \exp(-b(t-\alpha)) \cdots \alpha < t & (6 \cdot 10) \end{cases}$

⑤ $\begin{cases} 0 \cdots 0 < t < \alpha & (\text{図 6} \cdot 8 \text{ 参照}) \\ 1 - \exp(-b(t-\alpha)) \cdots \alpha < t & (6 \cdot 11) \end{cases}$

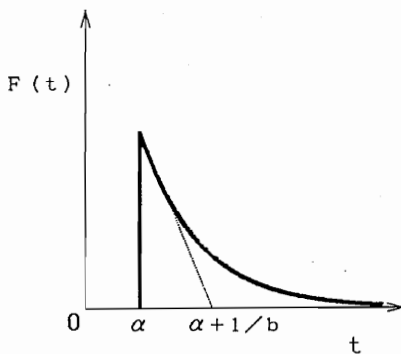


図 6 · 7 外乱 ④

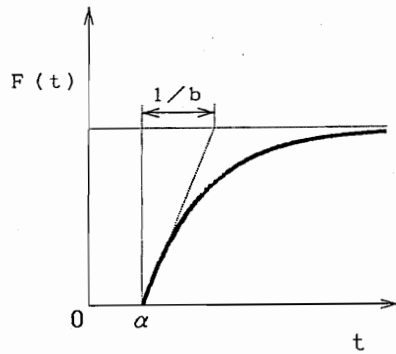


図 6 · 8 外乱 ⑤

(a), (b) の組み合わせで合計 15 の伝達関数ができる。
以下にそれぞれの一巡伝達関数を示す。但し、ここで用いる諸元は以下の通りである。

- $V^2 = r = 1000^2 = 10^4 [V^2]$
- $f_k = 10^{-4} [f/m]$
- $d = 0.5 [N]$
- $a = 0.1 [S]$
- $b = 1, \alpha = 0$

(1) 入力 : ステップ 外乱 : ステップ

$$g_h = \frac{\frac{1}{2}B1 + \frac{1}{2}B2j}{(B1)^2 + (B2)^2} \quad \begin{aligned} B1 &= 10^4 \left(1 - \frac{1}{2\omega} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right)\right) \\ B2 &= \frac{5000}{\omega} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) \end{aligned}$$

(6 . 1 2)

(2) 入力 : ステップ 外乱 : 単位インパルス

$$g_h = \frac{10^{-4} \{-B1 + \omega B2 + (B2 + \omega B1)j\}}{(B1)^2 + (B2)^2} \quad \begin{aligned} B1 &= 1 - \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) - \frac{\sin\left(\frac{\omega}{10}\right)}{\omega} \\ B2 &= \frac{\cos\left(\frac{\omega}{10}\right)}{\omega} - \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) \end{aligned}$$

(6 . 1 3)

(3) 入力：ステップ 外乱：ランプ

$$g h = \frac{-B1 - \frac{1}{2\omega} B2 - \left(\frac{1}{2\omega} B1 + B2\right) j}{(B1)^2 + (B2)^2} \quad B1 = 10^4 \left[1 + \frac{1}{\omega} \left\{ \frac{1}{2\omega} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) - \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) \right\} \right]$$

$$B2 = \frac{10^4}{\omega} \left\{ \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) + \frac{1}{2\omega} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) \right\}$$

(6 · 14)

(4) 入力：ステップ

外乱：
$$\begin{cases} 0 \cdots 0 < t < \alpha \\ \exp(-b(t-\alpha)) \cdots \alpha < t \end{cases}$$

$$g h = \frac{B1 \cdot K1 - B2 \cdot K2 - (B1 \cdot K2 + B2 \cdot K1) j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$K1 = 10^{-4} \left\{ -1 + \frac{\omega^2}{2(1+\omega^2)} \right\} \quad K2 = \frac{10^{-4} \cdot \omega^2}{2(1+\omega^2)}$$

$$B1 = 1 + \frac{\cos\left(\frac{\omega}{10}\right)}{2(1+\omega^2)} + \left\{ \frac{1}{\omega} - \frac{\omega}{2(1+\omega^2)} \right\} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right)$$

$$B2 = \left\{ \frac{1}{\omega} - \frac{\omega}{2(1+\omega^2)} \right\} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) - \frac{\sin\left(\frac{\omega}{10}\right)}{2(1+\omega^2)}$$

(6 · 15)

(5) 入力：ステップ

外乱：
$$\begin{cases} 0 \cdots 0 < t < \alpha \\ 1 - \exp(-b(t-\alpha)) \cdots \alpha < t \end{cases}$$

$$g h = \frac{B1 \cdot K1 + B2 \cdot K2 + (B2 \cdot K1 - B1 \cdot K2) j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$K1 = 1 - \frac{1}{2(1+\omega^2)} \quad K2 = \frac{\omega}{2(1+\omega^2)}$$

$$B1 = 10^4 \left[1 - \frac{1}{\omega} \left\{ \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) - \frac{\omega}{2(1+\omega^2)} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) \right\} \right]$$

$$B2 = \frac{10^4}{\omega} \left[\left\{ \frac{\omega}{2(1+\omega^2)} - 1 \right\} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) + \frac{\omega}{2(1+\omega^2)} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) \right]$$

(6 · 1 6)

(6) 入力 : ランプ 外乱 : ステップ

$$\varphi h = 10^{-4} \cdot \frac{-B1 - \frac{\omega}{2} B2 - \left(\frac{\omega}{2} B1 - B2 \right) j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$B1 = -1 - \frac{1}{\omega^2} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) + \frac{1}{2\omega} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) \quad B2 = \frac{1}{2\omega} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) + \frac{1}{\omega^2} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right)$$

(6 · 1 7)

(7) 入力 : ランプ 外乱 : 単位インパルス

$$\varphi h = \frac{B1 \cdot K1 - B2 \cdot K1 \cdot j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$K1 = 10^{-4}(1+\omega^2)$$

$$B1 = -1 - \left(1 + \frac{1}{\omega^2} \right) \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) \quad B2 = \left(1 + \frac{1}{\omega^2} \right) \sin\left(\frac{\omega}{10}\right)$$

(6 · 1 8)

(8) 入力 : ランプ 外乱 : ランプ

$$\varphi h = \frac{\frac{1}{2}(B1+B2 \cdot j)}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$B1 = 10^4 \left\{ 1 + \frac{1}{2\omega^2} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) \right\} \quad B2 = -\frac{10^4}{2\omega^2} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right)$$

(6 · 1 9)

(9) 入力 : ランプ

$$\text{外乱 : } \begin{cases} 0 \cdots 0 < t < \alpha \\ \exp(-b(t-\alpha)) \cdots \alpha < t \end{cases}$$

$$g_h = \frac{B1 \cdot K1 + B2 \cdot K2 + (B2 \cdot K1 - B1 \cdot K2) j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$K1 = \frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{2(1+\omega^2)} \quad K2 = \frac{\omega}{2(1+\omega^2)}$$

$$B1 = -\frac{10^4}{\omega^2} \left[1 + \left\{ \frac{1}{\omega^2} - \frac{1}{2(1+\omega^2)} \right\} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) - \frac{\omega}{2(1+\omega^2)} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) \right]$$

$$B2 = \frac{10^4}{\omega^2} \left[\left\{ \frac{\omega}{2(1+\omega^2)} \right\} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) + \frac{1}{\omega^2} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) \right]$$

(6 · 2 0)

(1 0) 入力 : ランプ

$$\text{外乱 : } \begin{cases} 0 \cdots 0 < t < \alpha \\ 1 - \exp(-b(t-\alpha)) \cdots \alpha < t \end{cases}$$

$$g_h = \frac{B1 \cdot K1 + B2 \cdot K2 + (B1 \cdot K2 - B2 \cdot K1) j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$K1 = -\frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{2(\omega^2+1)} \quad K2 = \frac{1}{2(\omega^3+\omega)}$$

$$B1 = \frac{10^4}{\omega^2} \left[-1 + \left\{ \frac{1}{2(\omega^2+1)} + \frac{1}{\omega^2} \right\} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) + \frac{\sin\left(\frac{\omega}{10}\right)}{2(\omega^3+\omega)} \right]$$

$$B2 = \frac{10^4}{\omega^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{\omega}{10}\right)}{2(\omega^3+\omega)} - \left\{ \frac{1}{2(\omega^2+1)} + \frac{1}{\omega^2} \right\} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) \right]$$

(6 · 2 1)

(1 1) 入力 : 定加速度 外乱 : ステップ

$$\varphi h = \frac{B1 \cdot K1 + B2 \cdot K1 \cdot j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$K1 = -10^{-4} \left(1 + \frac{\omega^2}{2} \right)$$

$$B1 = 1 - \left(\frac{1}{\omega^3} + \frac{1}{2\omega} \right) \cos \left(\frac{\omega}{10} \right)$$

$$B2 = \left(\frac{1}{\omega^3} + \frac{1}{2\omega} \right) \sin \left(\frac{\omega}{10} \right)$$

(6 · 2 2)

(1 2) 入力 : 定加速度 外乱 : 単位インパルス

$$\varphi h = \frac{-B1 \cdot K1 + B2 \cdot K2 - (B1 \cdot K2 + B2 \cdot K1) j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$K1 = 10^{-4} \quad k2 = 10^{-4} \cdot \omega^3$$

$$B1 = 1 - \frac{1}{\omega^3} \sin \left(\frac{\omega}{10} \right) + \cos \left(\frac{\omega}{10} \right)$$

$$B2 = \sin \left(\frac{\omega}{10} \right) + \frac{1}{\omega^3} \cos \left(\frac{\omega}{10} \right)$$

(6 · 2 3)

(1 3) 入力 : 定加速度 外乱 : ランプ

$$\varphi h = \frac{B1 \cdot K1 - B2 \cdot K2 + (B1 \cdot K2 + B2 \cdot K1) j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$K1 = 10^{-4} \quad K2 = \frac{10^{-4} \cdot \omega}{2}$$

$$B1 = 1 - \frac{1}{2\omega^2} \cos \left(\frac{\omega}{10} \right) - \frac{1}{\omega^3} \sin \left(\frac{\omega}{10} \right)$$

$$B2 = \frac{1}{\omega^3} \cos \left(\frac{\omega}{10} \right) - \frac{1}{2\omega^2} \sin \left(\frac{\omega}{10} \right)$$

(6 · 2 4)

(1 4) 入力 : 定加速度

$$\text{外乱 : } \begin{cases} 0 \cdots 0 < t < \alpha \\ \exp(-b(t-\alpha)) \cdots \alpha < t \end{cases}$$

$$gh = \frac{B1 \cdot K1 + B2 \cdot K2 + (B1 \cdot K2 - B2 \cdot K1)j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$K1 = \frac{10^{-4} \cdot \omega^4}{2(1+\omega^2)} \quad K2 = \frac{10^{-4} \cdot \omega^3}{2(1+\omega^2)}$$

$$B1 = 1 - \left\{ \frac{1}{\omega^3} + \frac{\omega}{2(1+\omega^2)} \right\} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) + \frac{\cos\left(\frac{\omega}{10}\right)}{2(1+\omega^2)}$$

$$B2 = \left\{ \frac{1}{\omega^3} + \frac{\omega}{2(1+\omega^2)} \right\} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) + \frac{\sin\left(\frac{\omega}{10}\right)}{2(1+\omega^2)}$$

(6 · 2 5)

(1 5) 入力 : 定加速度

$$\text{外乱 : } \begin{cases} 0 \cdots 0 < t < \alpha \\ 1 - \exp(-b(t-\alpha)) \cdots \alpha < t \end{cases}$$

$$gh = \frac{B1 \cdot K1 - B2 \cdot K2 + (B1 \cdot K2 + B2 \cdot K1)j}{(B1)^2 + (B2)^2}$$

$$K1 = 10^{-4} \left\{ \frac{\omega^2}{2(1+\omega^2)} - 1 \right\} \quad K2 = \frac{10^{-4} \cdot \omega^3}{2(1+\omega^2)}$$

$$B1 = 1 - \left\{ \frac{1}{\omega^3} + \frac{1}{2(\omega^3 + \omega)} \right\} \sin\left(\frac{\omega}{10}\right) - \frac{\cos\left(\frac{\omega}{10}\right)}{2(1+\omega^2)}$$

$$B2 = \left\{ \frac{1}{\omega^3} + \frac{1}{2(\omega^3 + \omega)} \right\} \cos\left(\frac{\omega}{10}\right) - \frac{\sin\left(\frac{\omega}{10}\right)}{2(1+\omega^2)}$$

(6 · 2 6)

以上の一巡伝達関数の内(14)を例に挙げる。図6・9に示すように ω の増加と共に一巡伝達関数の絶対値も大きくなるが、ナイキストの安定判別によると安定である。このように入力信号が評価の対象に入り込んだものは、その都度ゲイン余裕、

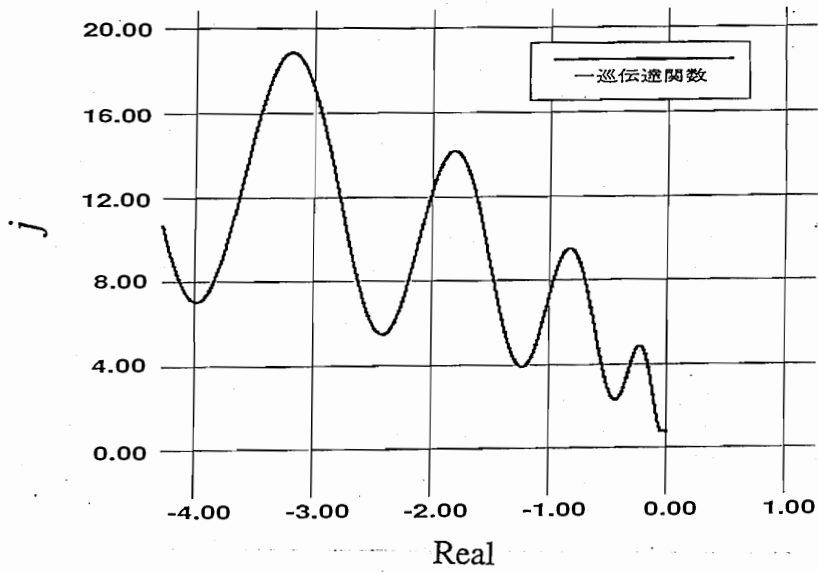


図 6 ・ 9 (1 4) の一巡伝達関数

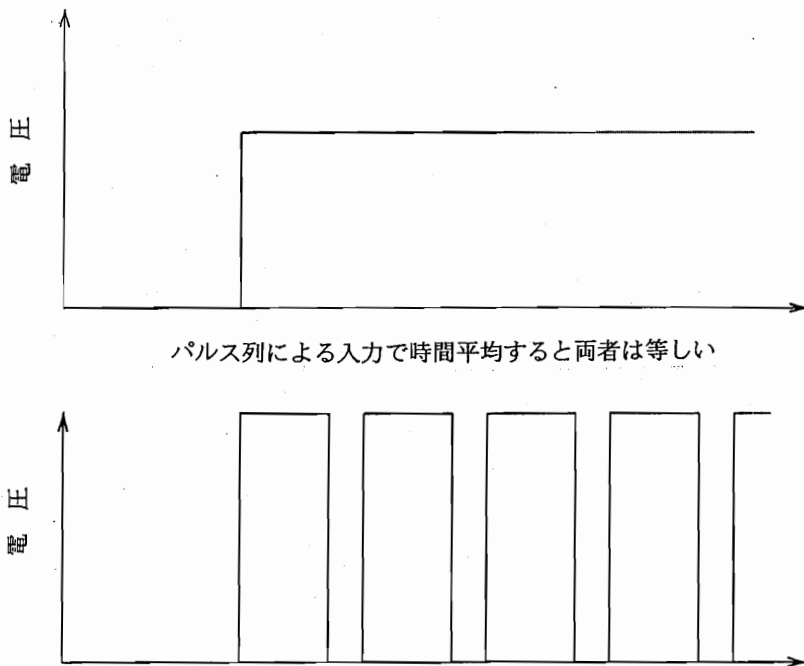


図 6 ・ 1 0 入力波形の一例

位相余裕, 定常偏差, 過渡偏差等を求めて評価する必要がある。今回の15通りを評価した結果, 入力をステップ状にとると不安定になるため, 電圧を図6・10に示すように, 時間積分した値が入力値になるという仮想的な入力信号は適さないことが分かった。今後, 用途に応じて制御系の検討をする必要がある。

6・6 小括

力制御を行う場合は変位置制御が難しく, 本研究の駆動原理で任意の変位置を取り出すには, 負荷が加わると同時に大変難しくなる。しかし, 本研究のアクチュエータの特長は簡単な構造で力制御ができる点にあるので, 今後用途を考慮して有益な使用方を検討すればよい。但し, 伝達関数に入力信号が関与するため, 外乱の加わり方等条件の変更に伴いその都度評価しなければならない。今回の評価の仕方を用いた場合, コンピュータのメモリがメガバイト単位で必要になることを付け加えておく。

第 7 章 結 論

7・1 今年度の研究成果

7・1・1 素子の形状について

素子を立体的に集積化する場合、空間的な電極配置パターンは推力に影響せず、ステータの厚みも推力に影響を及ぼさないことが、有限要素法を用いた電位分布シミュレーションにより明らかになった。

また、現状の加工技術や素材の性質上、スライダは厚さ 0.5 [mm] のものを用いた。このスライダに適した基本素子を確立するため、ギャップは 0.064 [mm] として設計方針を立てた。スライダが発生する推力の理論式は、ギャップ g 、スライダ厚さ d 等の変数が複雑に関与するため、これ等の変数を無次元化することができず、最適アスペクト比などの理論的検討を困難にしている。よって上記のスライダ厚さ d とギャップ g を用いることを大前提にして、加工精度等を検討した。その結果、電極間吸引力によるステータのたわみは考慮に入れる必要がなく、加工精度は従来より 1 桁落とした、平面度、平行度それぞれ 10 [μm] を用いても推力はさほど変化せず、返って力密度の上昇が期待されることが分かった。

7・1・2 3次元レベルの最適アスペクト比

静電アクチュエータは平面力で駆動し、体積力を利用した電磁形のアクチュエータに比べ基本素子を小さくすればするほど力密度の点で有利になる。しかし、多層集積化する際にはいたずらに

電極長さ l を短くして小形化したものを集積するのではなく、力密度をできるだけ大きくなるように集積化するのが好ましい。その限界点となるアスペクト比を見極める必要がある。

7・1・1節で述べたように理論式は無次元化できないため、最適なアスペクト比を見いだすには、電極間距離を固定してアスペクト比を変える方法、つまり電極長さのみを変えて実験を行うことが必要になる。本年度は昨年度の成果を踏まえて、アスペクト比0.6から1.5まで0.1刻みで10種類のモデルを製作し、新たな評価方法を考案してデータ処理を行った。

その結果、単位体積当たりの発生推力はアスペクト比1.0付近で最高になることが分かった。これ以上集積化しても力密度は上昇せず返って下降する。

本年度製作したアスペクト比0.8の多層集積化モデルは、実験上の利便性や加工製作上の制約から妥当であると言えるが、将来的にアスペクト比を1.0に近づけたモデルを製作した場合、更に力密度の大きな静電リニアアクチュエータ誕生の可能性が有ることが分かった。

7・1・3 多層集積化モデルの静推力

一層につき20個の基本素子を集積化したものを5層組み合わせ、合計100個の基本素子を有する外寸 $44 \times 44 \times 8.82$ [mm]のモデルを試作した。100 [V]、10 [kHz]の交流電圧印加で、推力31.85 [mN]、力密度1865 [N/m³]以上を発生し集積化の効果を確認できた。

7・1・4 連続駆動動作確認実験

スイッチボックスからの操作により、可動子であるスライダは2分の1電極に相当する、1ピッチ0.25 [mm]のリニアな

連続駆動を確認できた。

また、スイッチングの早さを変えると、それに応じてスライダの移動速度も変わることも確認できた。但し、将来的に本格的な連続駆動をするような場合、負荷が加わると今の機構をそのまま小形化、自動化しただけでは力一定駆動は難しく、滑らかな動きをするのも難しい。今後、単なる駆動理論の確認や動作確認といった領域を脱した、制御方法や性能向上を睨んだ研究姿勢が必要であると言える。

7・2 今後の課題と展望

7・2・1 当面の課題

今年度製作した多層集積化静電リニアアクチュエータは、静電気力を利用したアクチュエータとしては、従来にない力密度を発生する可能性があることが分かった。多層集積化モデルは入力信号として簡単に入手できる100[V]、10[kHz]の交番電圧を用いたが、横方向集積化モデルは200[V]、10[kHz]の交番電圧を印加した際、力密度8663[N/m²]を発生し、大幅な性能向上を遂げた。

但し、できるだけ低い電圧で駆動することが望まれ、将来的には更なる微小化と多層集積化を実現させ、駆動効率を向上させることが望まれる。

また、本年度はスライダにファインセラミックを用いたが、加工技術の制約が大きいため、新たな素材の調査を進める必要がある。実験環境についても、集埃をしない筐体の開発が必要であることが浮き彫りになった。更にこの筐体は、外部からの電界等の影響も遮断することが望ましい。

連続駆動に関しては、負荷を考慮した駆動方法に改良し、任意の変位が制御できるようにする余地がある。

7・2・2 人工筋肉へのアプローチ

アクチュエータ研究者の一つの大きな目標は、生物の筋肉と同等の性能を有するモデルを開発することにある。生物の筋肉は力密度とエネルギー変換効率が高く冗長性もあるので、現在のどのアクチュエータの如何なる利点をも凌ぐものである。生体の筋肉は幾つもの微小なアクチュエータを結合することによって、ストロークと力を希望通り得られる。静電アクチュエータはその構造の点で類似のものであり、生体の筋肉を模擬していると言ってよい。

エネルギー変換効率を生体の筋肉に近づけるためには、第4章でも触れたように、電流の漏洩を抑える必要がある。そのため一度コンデンサに蓄えられたエネルギーを回収する回路が必要になる。今後、こういったエネルギー回収回路についても検討していかなければならない。

また、現在では素材による制約が大きいため、あまり高電圧を印加するとギャップ充填剤が電気分解をはじめたり、気泡の発生による推力の低下、更には突然の絶縁破壊による性能低下等の問題点を一つずつ解決していかなければならない。

引用・参考文献

- 1) 光岡豊一, 日本機械学会講習会メカトロニクス基礎シリーズ教材－アクチュエータとその応用, 1992, P25, 日本機械学会
- 2) 光岡豊一, 日本機械学会講習会メカトロニクス基礎シリーズ教材－アクチュエータとその応用, 1992, P25, 日本機械学会
- 3) 光岡豊一, 日本機械学会講習会メカトロニクス基礎シリーズ教材－アクチュエータとその応用, 1992, P26, 日本機械学会
- 4) 樋口俊郎, 日本機械学会講習会マクロ化技術の最前線教材－アクチュエータのマイクロ化技術, 1992, P6, 日本機械学会
- 5) 吉澤秀明, 静電アクチュエータに関する基礎的研究, 1992, P48, 早稲田大学卒業論文
- 6) 倉田浩, 集積形静電アクチュエータの基礎的研究－多電極素子による静推特性試験と動作確認－, 1990, P51, 早稲田大学修士論文
- 7) 浅野和俊, 大橋朝夫, 1985, P32, 朝倉書店
- 8) 小笠原幹, 静電リニアアクチュエータに関する基礎的研究, 1991, 早稲田大学修士論文
- 9) 電気学会編, 誘電体现象論, 1984, オーム社
- 10) 静電気学会, 静電気ハンドブック, 1986, オーム社
- 11) 電気学会通信教育会, 制御工学, 1979, オーム社
- 12) 示村悦二郎, 自動制御とは何か, 1992, コロナ社
- 13) 松山裕, だれでもわかる自動制御, 1992, 省エネルギーセンター
- 14) 河合素直, 制御工学－基礎と例題－, 1986, 昭晃堂