

# 電気流体力学効果の解析と新規流体デバイスの開発

(課題番号12555210)

平成12年度～平成14年度科学研究費補助金

(基盤研究(B)(2))

研究成果報告書

平成15年5月

研究代表者 大坪泰文  
(千葉大学工学部教授)

## は し が き

本報告書は、平成 12 年度から 14 年度にわたって交付された文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（B）（2））によって行われた「電気流体力学効果の解析と新規流体デバイスの開発」の研究成果をまとめたものである。

絶縁性の油に高電圧を印加すると、液体内部に大規模な不安定流動、カオス、循環流など二次的な流れが発生することがあり、これらを総称して電気流体力学効果 (Electrohydrodynamic Effect、略して EHD 効果) と呼ぶ。これまでの研究によると、EHD 効果は液体中における導電率または誘電率の不均一性により流体内部に電氣的な力が発生することに起因すると説明されている。直流電場では、誘電分極に起因する誘電泳動力より自由電荷に作用する Coulomb 力が支配的となる。つまり、極めて微弱な電流が EHD 対流を支配することを意味しており、液体の導電率が最も重要なパラメータとなる。EHD 効果による二次流れは、液体に電場を印加するだけで発生するものであり、この過程では、電気エネルギーが直接的に液体の運動エネルギーに変換されていることになる。したがって、EHD 対流を任意に制御できるようになると、駆動源としてばかりでなく、新しいエネルギー変換機構として新規流体デバイスへ応用できる可能性をもっている。本研究は、高電場下における絶縁性流液体の流動学的基本挙動を現象論的に把握し、液体物性と関係づけて EHD 流動の発生メカニズムを定量的に解明することを目的とする。さらに、その基礎研究に基づき EHD 流動の制御法を確立し、新規な流体素子を開発するとともに、その機能を実用レベルまで向上させ新しい技術として構築することを目ざすものである。

研究組織、研究経費、研究発表については以下に示すとおりである。

《研究組織》

研究代表者 : 大坪泰文 (千葉大学工学部教授)  
研究分担者 : 枝村一弥 ((有) 新技術マネジメント・  
代表取締役)

《研究経費》

平成 9 年度	6, 6 0 0 千円
平成 1 3 年度	3, 4 0 0 千円
平成 1 4 年度	1, 2 0 0 千円
計	1 1, 2 0 0 千円

《研究発表》

(1) 学会誌等

1. 横田眞一、貞本敦史、近藤 豊、大坪泰文、枝村一弥、  
“電界共役流体 (ECF) を応用したマイクロモータ[ステータ電極  
(SE) 型マイクロ ECF モータの提案]”  
日本機械学会論文集 (C 編) , 66, 627-633(2000)
2. 横田眞一、吉田和弘、岡安 毅、川上和英、大坪泰文、  
枝村一弥  
“ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動マイクロポンプ”  
日本機械学会論文集 (C 編) , 66, 3516-3522(2000)
3. 横田眞一、根本敏之、近藤 豊、大坪泰文、枝村一弥  
“電界共役流体 (ECF) を応用したマイクロモータ[ロータ電極  
(RE) 型マイクロ ECF モータの提案]”  
日本機械学会論文集 (C 編) , 66, 3799-3804(2000)
4. 横田眞一、近藤 豊、石原幸吉、大坪泰文、枝村一弥  
“植毛電極による誘電液体の粘度増加を用いた液圧制御弁 (植

毛 ER バルブの提案)”

日本機械学会論文集 (C編) , 67, 1619-1626(2001)

5. Shinichi Yokota, Masakazu Hirata, Yutaka Kondoh, Koichi Suzumori, Atsushi Sadamoto, Yasufumi Otsubo, Kazuya Edamura

“Micromotor Using Electroconjugate Fluid(Fabrication of Inner Diameter 2 mm RE Type ECF Motor)”

J. Robotics Mechatronics, 13, 140-145(2001)

6. Shinichi Yokota, Atsushi Sadamoto, Yutaka Kondoh, Yasufumi Otsubo, Kazuya Edamura

“A Micromotor Using Electroconjugate Fluid(ECFs) (Proposition of Stator Electrode Type(SE-type) micro ECF Motors)”

JSME International J., C, 44, 756-762(2001)

7. 横田眞一、佐藤大輔、近藤 豊、大坪泰文、枝村一弥

“電界共役流体 (ECF) を応用したモータ (ディスクプレート形 ECF モータの提案)”

日本機械学会論文集 (C編) , 67, 4032-4037(2001)

8. 大坪泰文

“エレクトロレオロジー流体 ~画像技術への応用~”

日本印刷学会誌、38, 231-237(2001)

9. Yasufumi Otsubo, Yasuharu Suda

“Electrorheological Toners for Electrophotography”

J. Colloid Interface Sci., 253, 224-230(2002)

#### 口頭発表

1. 尾崎行信、大坪泰文

“電場下における絶縁性流体の循環流”

化学工学会第33回秋期大会

2000、9、12、浜松

2. 大坪泰文

“電場下における絶縁性オイルの高速ジェット流”

第50回理論応用力学講演会

2001、1、15、東京

3. 尾崎行信、大坪泰文

“針状電極間における絶縁性液体の高速循環流”

化学工学会第34回秋期大会

2001、9、28、札幌

4. 石井千明、加納博文、大坪泰文、

“ナノ細孔性微粒子の細孔内修飾によるエレクトロレオロジー  
流体の創製”

化学工学会第67年会

2002、3、27、福岡

5. 石井千明、大坪泰文、加納博文

“銅フタロシアニン挿入によるナノ細孔性微粒子サスペンション  
のエレクトロレオロジー効果”

第55回コロイドおよび界面化学討論会

2002、9、13、仙台

6. 上林将史、小倉裕直、大坪泰文、枝村一弥

“電気流体力学効果を応用した新規インクジェット機構”

日本印刷学会第109回秋期研究発表会

2002、11、8、大阪

# 目 次

1. はじめに	1
2. 本研究の基盤となる考えとこれまでの経緯	3
2. 1 液体モーターに関する研究	3
2. 2 ER 効果に関する研究	9
3. 本研究の成果	20
I. EHD ジェット流発生機構に関する現象論的研究	21
I-1 針状電極間の流動パターンに関する観察	23
I-2 電場下において液体中に発生する圧力	29
II. 純液体の ER 効果および植毛電極を用いた ER バルブ	37
II-1 Electrorheology of dielectric fluids	38
II-2 植毛電極による誘電液体の粘度増加を 用いた圧力制御弁	48
III. 液体モーターの性能と小型化	56
III-1 電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ ステータ電極(SE)形マイクロ ECF モータの提案	57
III-2 電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ ロータ電極(RE)形マイクロ ECF モータの提案	64
III-3 Micromotor using electroconjugate fluid	70
III-4 A micro motor using electroconjugate fluids(ECFs)	76
III-5 電界共役流体(ECF)を応用したモータ (ディスクプレート形 ECF モータの提案)	83

IV. 新規マイクロポンプおよびインクジェット機構 の開発	89
IV-1 ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動 マイクロポンプ	90
IV-2 A new inkjet device on the basis of electrohydrodynamic mechanism	97

# 1. はじめに

絶縁性の油（電気を全く通さない液体は現実には存在しないわけであり、実用上は非常に電気抵抗が高い液体と言い換えることができる。物理学の分野では誘電性液体という）に高電場を与えると、流体内部に発生する電氣的な力により不安定性流動を引き起こすことがある。高電場において絶縁性液体に対流あるいは2次流れが発生する現象を電気流体力学（Electrohydrodynamic, 略してEHD）効果と呼ぶ。

高電場における流体の EHD 流動に関しては、液晶などごく限られた液体について物理的な研究がなされているが、通常の誘電性液体における基本メカニズムについてはあまり詳しく研究がされているとは言い難い状況である。これまでの研究によると、通常の条件では EHD の流速は毎秒数 cm から 10cm 程度と言われている。しかし、われわれは、ある種の流体に直流の高電場を印加するだけで秒速数 m でジェット噴流が発生することを見い出した。このような高速のジェット噴流はこれまで認められているメカニズムでは定量的に説明することができないが、絶縁性液体に高電場を印加するだけで発生するものであり、このプロセスにおいては電気エネルギーが直接的に液体の運動エネルギーに変換されていることを示している。したがって、ジェット噴流を任意に制御できるようになると、新しい駆動源、エネルギー源あるいは輸送手段として様々な機械に応用できると考えられる。これまでの研究で明かになった重要な事柄は、流体ジェット現象が起こるためには液体の導電率と粘性率がある範囲に入っていないといけないということであり、この2つが支配因子と推察される。本研究は、EHD 流動およびジェット噴流の発生メカニズムとその制御法を確立し、新規な流体デバイスを開発するための設計指針を構築することを目的とするものである。この技術の体系をまとめたのが図 1-1 であり、次世代の新技术として飛躍的な発展が期待されるものである。

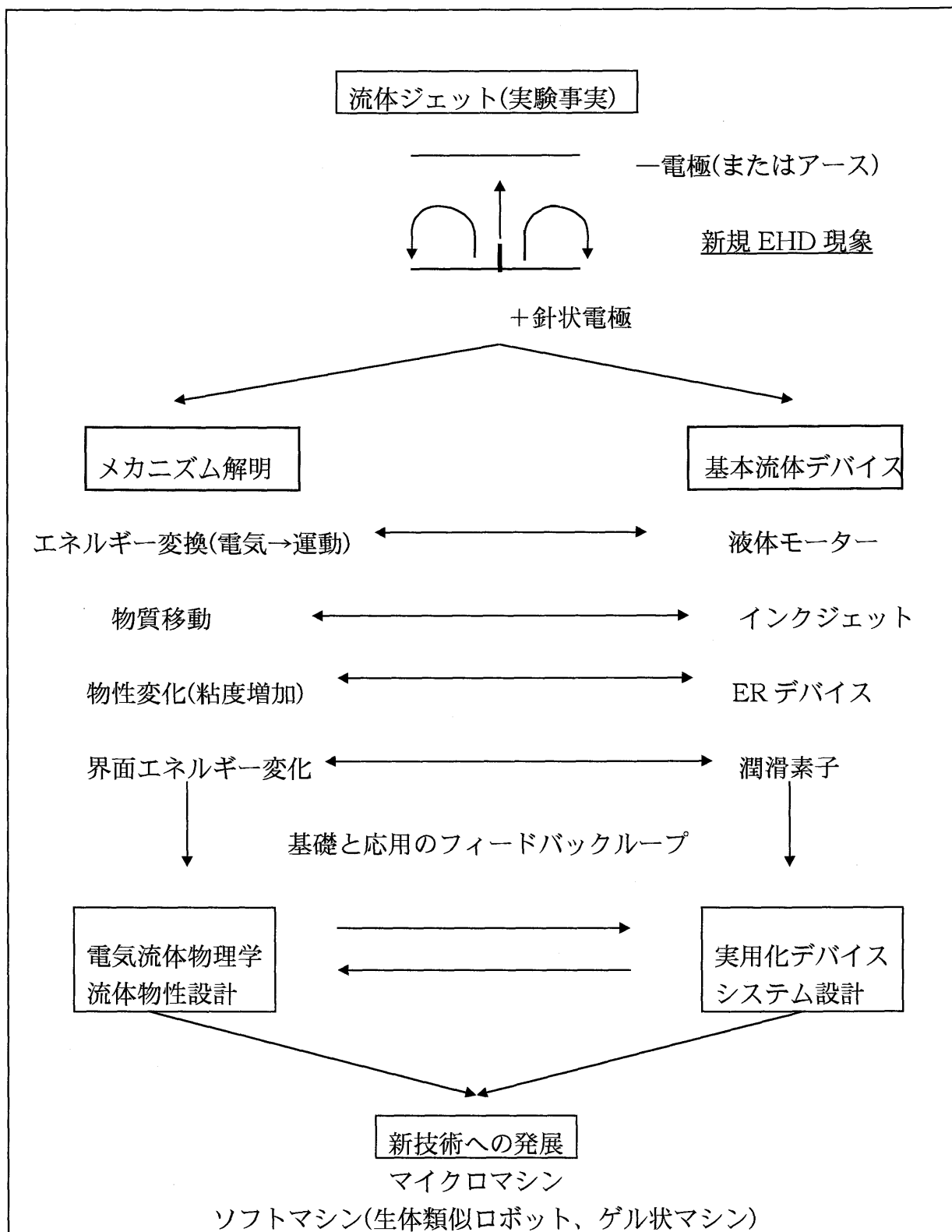


図 1-1 本研究を基盤とする EHD 技術とその開発体系

## 2. 本研究の基盤となる考えとこれまでの経緯

### 2. 1 液体モーターに関する研究

#### 2. 1. 1 誘電液体モーターの基本原理

絶縁性の油に直流高電場を印加すると、+電極から  $1\text{ ms}^{-1}$  以上のジェット流が吹き出していることを見出し、この高速 EHD 流を制御することにより、誘電液体モーターを開発した [1]。図 2-1 は製作したモーターの模式図である。構造は極めて簡単で、ケース (C)、8 枚の羽根をもつローター (V)、2 組の電極 (E)、作動液体 (L) から構成されている。ケースとローターはテフロン製であり、電極は銅線からできている。本研究では、ケースの深さとローターの浸液長 (30 mm) が同じで半径が異なる 2 組のモーターを試作した。作動液体としては後に述べるようにいくつかの誘電液体が有効である。作動流体はローターの羽根が完全に沈むようにケースに満たされている。電極はケースの周囲に  $45^\circ$  の角度で対称になるように配置され、+側に直流電圧を印加し、-側はアースとした。

図 2-2 は、作動液体としてデカン二酸ジブチルを用いたモーターについて、直流電圧を印加したときの電圧と角速度との関係である。電圧が高いときは、印加とほとんど同時に回転運動が始まり、このときローターは時計方向に回転する。極性を逆にすると回転方向も逆になるが、角速度の電圧依存性には変化は認められない。角速度は電圧とともに増加し、同じ電圧で比較すると、ローターが小さい方が高速回転する。しかし、いずれにおいても定常的な回転運動を起こすためにはある臨界値以上の電圧が必要と思われる。臨界電圧は小ローターで 3.0 kV、大ローターで 4.5 kV であり、臨界電圧における角速度はローターのサイズによらず、ほぼ  $0.2\text{ s}^{-1}$  (2 rpm) であった。電圧が臨界値より低い場合、電圧印加の瞬間にローターが 30~40 度程度回転するが、すぐに減衰振動を起こして定常回転には至らず静止する。高電

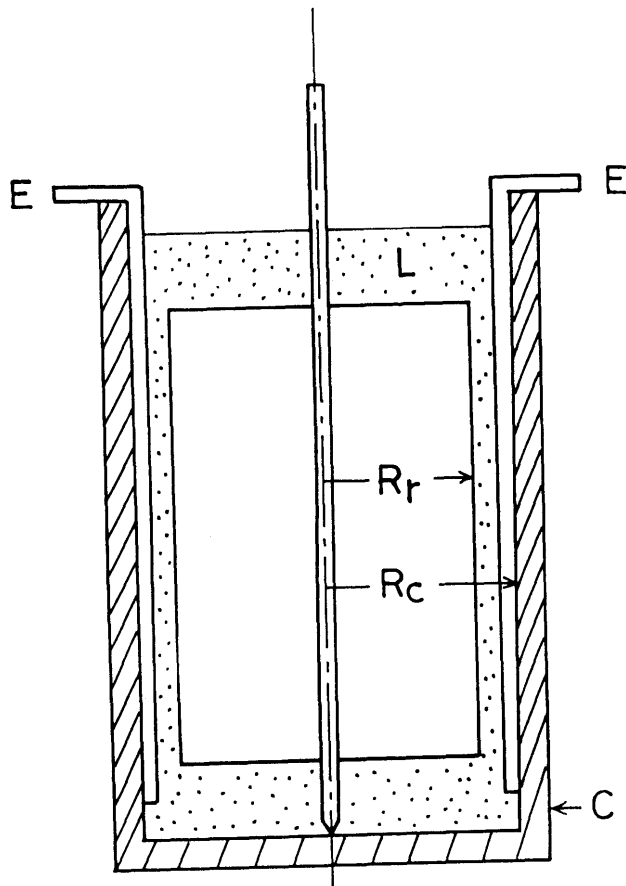
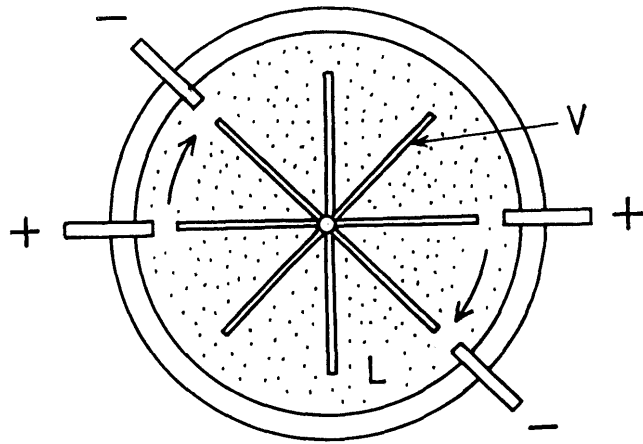


図 2-1 誘電液体モーターの構造

$R_r = 10 \text{ mm}$ 、 $21 \text{ mm}$ 、 $R_c = 12.5 \text{ mm}$ 、 $25 \text{ mm}$

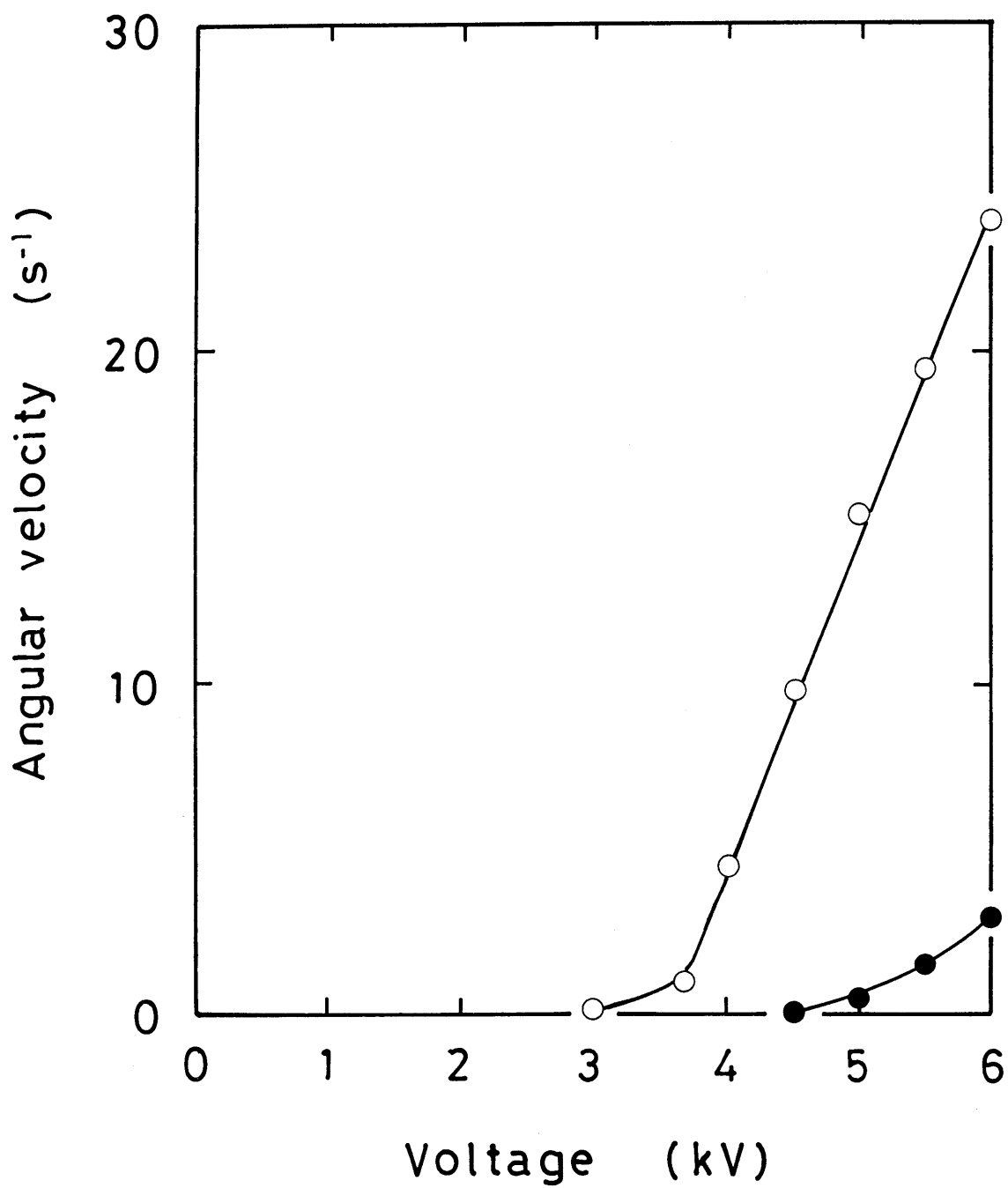


図 2-2 回転数と電圧との関係  
(●) 大ローター、(○) 小ローター

圧における回転速度は大きく、たとえば、5.0 kV では小ローターの周速度は  $0.16 \text{ m}^{-1}$  にもなり、実用レベルのモーターに近いものと考えられる。このときの電流は電極 1 組当り  $2.8 \mu\text{A}$ 、すなわち、モーター全体としての消費電力は  $28 \text{ mW}$  であった。本誘電液体モーターにおいては、作動液体中を電流が流れていることになるが、極めて微弱であるため、温度上昇がほとんど起こらず定常回転運動が持続することが確認された。

電気エネルギーから運動エネルギーへの変換効率を推算するため、トルク測定を行った。EHD モーターの軸をストレスレオメータ (Haake Rheo-Stress RS 100) の回転軸に固定し、角速度  $15.7 \text{ s}^{-1}$  (周速度  $0.16 \text{ ms}^{-1}$ ) の回転運動を再現したときのトルクは、小ローターで  $7 \times 10^{-5} \text{ Nm}$  であった。したがって、5.0 kV においては  $1.1 \text{ mW}$  のエネルギーが回転運動に変換されていることになり、その効率は約 4% であった。しかし、これはモーターとしては無負荷運転に相当する。負荷運転での効率 (動力源として外に取り出せるエネルギーの効率) を求めたところ、角速度  $10 \text{ s}^{-1}$  で  $2 \times 10^{-5} \text{ Nm}$  のトルクが得られた。効率は 0.73% である。モーターとしての効率およびパワーはかなり低いですが、体積を小さくすると効率が高くなることがわかった。今後、新技術として発展が期待されているマイクロマシン分野で微小あるいはマイクロモーターへ応用できるものと考えられる。

## 2. 1. 2 誘電液体の物性とモーター性能との関係

プロトタイプモーターで用いた作動液体はデカン二酸ジブチルであるが、流体ジェット発生には液体の物性が大きく係わっているはずである。そこで、液体物性とモーターの回転運動との関係を検討するため、作動液体を変えて実験を行った。用いた液体はフタル酸ジメチル、フタル酸ジブチル、フタル酸ジオクチル、マレイン酸ジブチル、フマル酸ジブチルなど約 50 種類の誘電液体である。図 2-1 に示した内径 20 mm の小モーターを用いて 5.0~6.0 kV の電圧を印加したときの

動作特性を調べるとともに、電場強度  $2.0 \text{ kVmm}^{-1}$  における電気伝導度  $\sigma$  と粘度  $\eta$  を測定した。測定は  $25^\circ\text{C}$  で行ったが、すべての液体がせん断速度が  $100 \text{ s}^{-1}$  以上でニュートン流体であった。モーター性能に関する実験結果を図 2-3 に示す。ここでは、 $5.0 \text{ kV}$  を印加したとき  $1 \text{ s}^{-1}$  (約  $10 \text{ rpm}$ ) 以上でモーターを回転させることができる液体を有効な作動液体と判断した。電場を印加した瞬間にこれ以下の速度で回転を始めるものもあるが、このような液体の場合、すぐに回転速度が減少して止ってしまい、定常回転には至らなかった。長時間にわたって定常回転が継続する液体ではすべて回転速度は  $1 \text{ s}^{-1}$  以上であった。また、電場を印加してから最初に手動で回転を与えても定常回転にはいたらず、運動が減衰してしまったものもあった。図 2-3 は、作動液体としての有効性を液体物性の関数として示したものである。縦軸が粘度、横軸が導電率であり、作動液体としてモーターに入れたとき回転したものを○、定常回転に至らなかったものを×で示した。EHD モーターとして有効な液体は3本の直線で囲まれた領域にあることがわかる。すなわち、 $\eta > 5 \times 10^{-4} \text{ Pas}$ 、 $\sigma > 5 \times 10^{-10} \text{ Sm}^{-1}$ 、 $\eta\sigma < 1.5 \times 10^{-10} \text{ PasSm}^{-1}$  の条件を満足する液体が EHD モーターの作動液体として有効であるといえる。

さて、本研究で開発したモーターは交流では機能しなかった。したがって、回転運動を支配する最も重要な因子は液体の導電率と思われる。直流電場で液体中に電気伝導が起こるためには自由電荷が必要である。その発生原因としては大きく2つの機構が考えられる。一つは中性分子の解離であり、他の一つは電極からの電荷注入である。本研究で用いた50種類の液体についてその導電機構を解明しているわけではないので、はっきりと言い切ることは困難である。しかし、図 2-3 のデータを基にすると、導電機構は異なっても導電率と粘度だけの関数で作動条件を論ずることができると推察される。

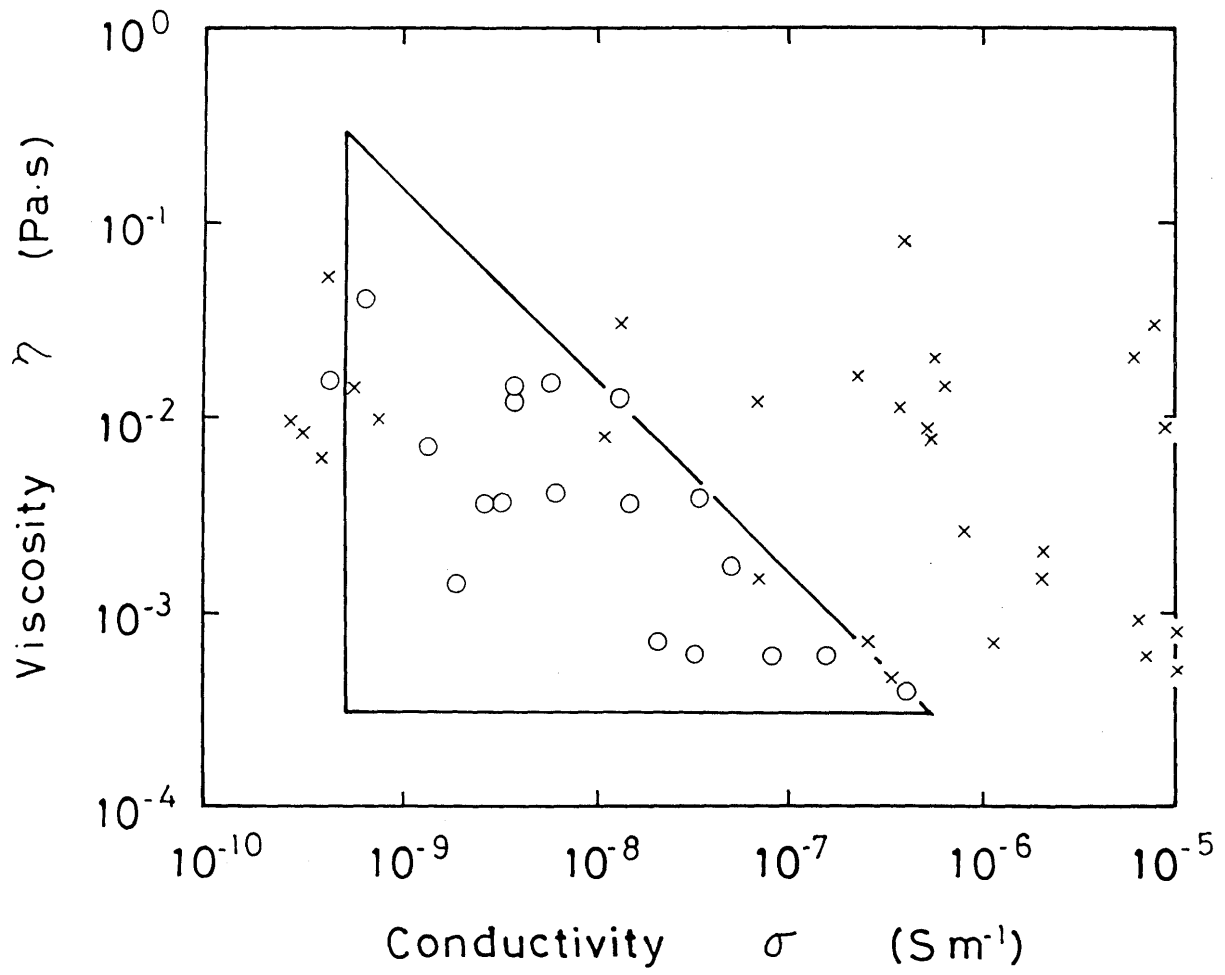


図 2-3 液体物性と作動条件との関係

(○) モーターとして作動 (×) 定常回転に至らない

## 2. 2 ER 効果に関する研究

### 2. 2. 1 植毛電極による ER 効果の発現

外部電場のオン・オフにตอบสนองして液体のレオロジー的性質が可逆的に変化する現象をエレクトロレオロジー効果 (Electrorheological Effect、ER 効果と略す) といい、そのような機能を有する流体をエレクトロレオロジー流体 (ER 流体と略す) という。ER 流体は、大別して粒子分散系と液晶系とに分けられる。粒子分散系は電場によりゲル化し、降伏応力以下では弾性固体として振る舞う [2、3]。これは、粒子が電場方向に配列し電極間に鎖状構造が形成されることに起因する。液晶系においては、分子がある方向に配向したドメイン構造をとっており、電場によるドメイン間相互作用の増大により粘度増加が起こる [4、5]。現在知られている ER 流体はいずれも構造的な流体である。しかし、パーフルオロアルキルモノカルボン酸などの有機フッ素化合物粒子分散系では電場中で EHD に起因する規則的な循環流が発生し、これを外部からの強制せん断流との相互作用の結果、粘度増加が観測されることを見出した [6]。均一の絶縁性油でも EHD 対流が誘発され、均一電場より不均一電場において顕著になることが知られている。したがって、ジェット噴流およびそれに起因する循環流も不均一電場で激しくなるものと考えられる。フッ素系分散系の ER 挙動に関する研究を基にすると、外部から強制せん断を受けている系内において高度に EHD 対流が発生すると、オーバーオールに反応として見かけの粘度 (流動抵抗) に変化が現れると期待される。そこで、大規模な EHD ジェットを発生させるため、植毛電極を用いて電場下における絶縁性液体の流動挙動について検討した [7]。

図 2-4 は、電極の構造を模式的に示したものである。+側は、太さ 3 デニール (17  $\mu\text{m}$ ) のレーヨン繊維を直径 35 mm の金属版の上に植毛仕上げした電極であり、-側はステンレス平板である。この間に試料液体を挟んだが、繊維の間隙にも液体が満たされている。ここで

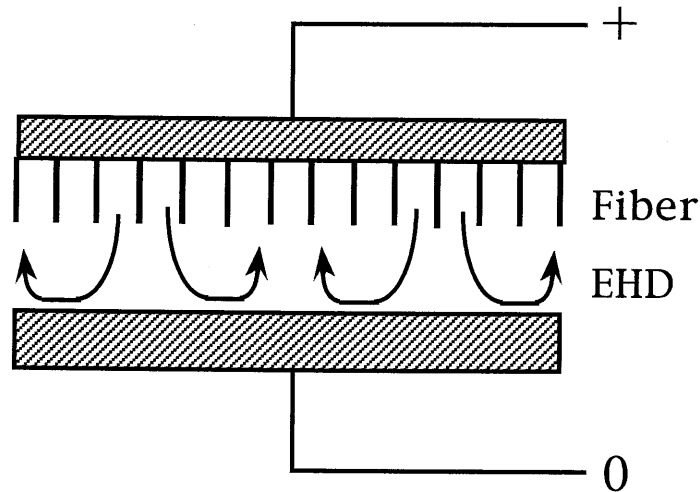


図 2-4 植毛電極の構造

は、アース側電極と繊維の先端との液体のみで満たされた部分だけで流動が起こると仮定してレオロジー量を決定した。用いた流体は、油圧作動油（出光スーパーハイドロ 32）である。通常の測定法、すなわち 2 枚の平板電極の間に流体を挟み電場を印加して粘度増加を測定するという方法で調べても、この流体自体には大きな ER 効果は認められない。なお、すべての測定条件で、試料流体の電流密度は  $5 \mu\text{Acm}^{-2}$  以下であった。

レオロジー測定にはストレスレオメーター（Haake 製 RS100）を ER 用に改良し、電圧  $E$  が  $0 \sim 4.0 \text{ kV}$ （直流）の範囲で定常せん断粘度および動的粘弾性を測定した。測定温度は、 $25^\circ\text{C}$  である。なお、すべての測定条件で、流体の電流密度は  $50 \text{ mAcm}^{-2}$  以下であった。

図 2-5 は、繊維長さ  $1\text{mm}$  の植毛電極を用い、試料間隙  $0.5 \text{ mm}$  において粘度挙動に及ぼす電場強度の影響を調べた結果である。電場を与えない場合、ほとんど分散媒と同粘度のニュートン流体と近似される（ $0.5 \text{ mm}$  ギャップの平行平板で通常の粘度測定をしたときと同じ値）。これに電場を与えると測定せん断速度全域で粘度増加が起こるが、

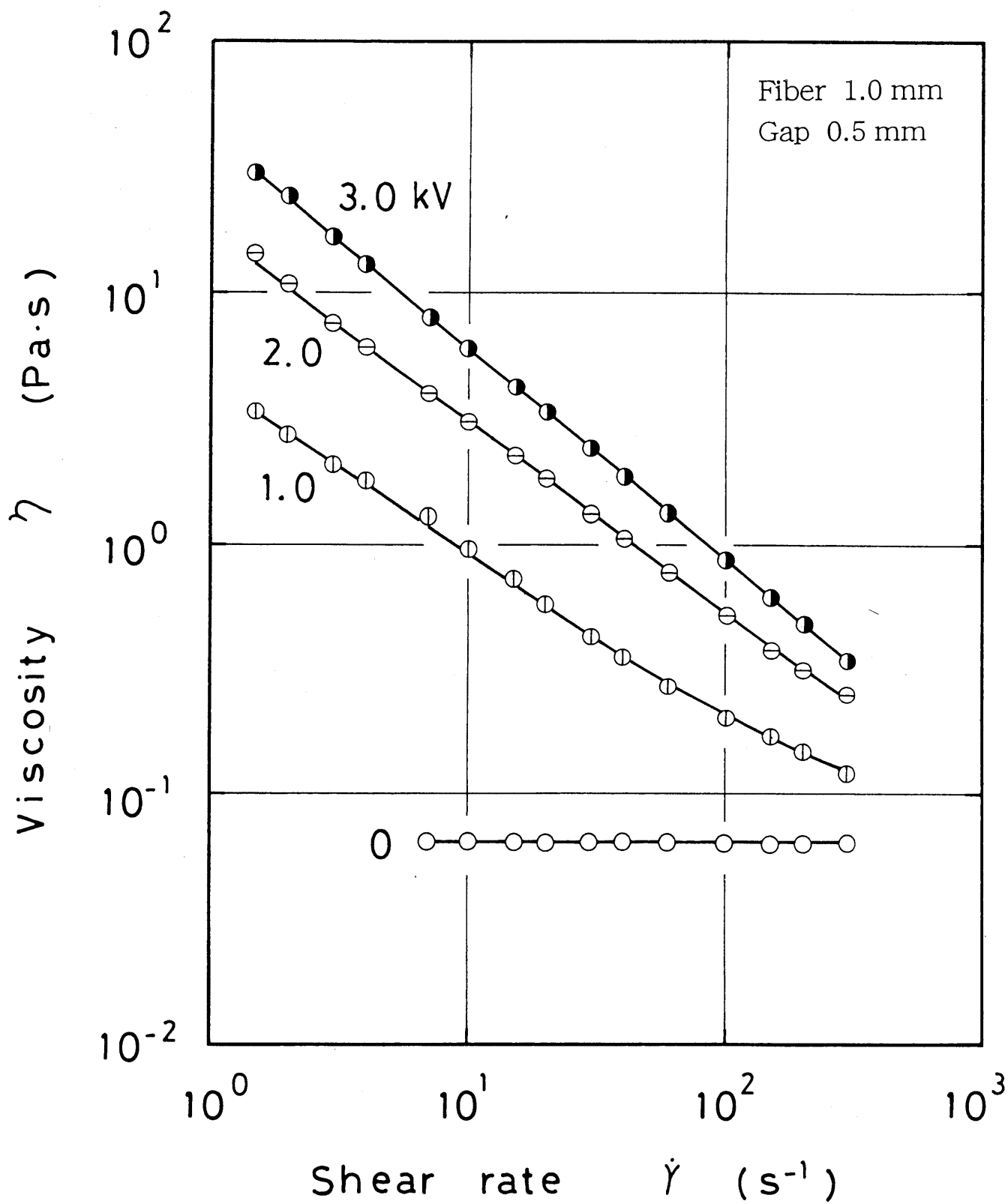


図 2-5 油圧作動油の粘度挙動に及ぼす電場強度の影響

低せん断速度ほど増加率は大きく、shear thinning 流動となる。粒子を含まない誘電液体だけでもこれまで知られている ER 流体のような流動挙動が現れる。

図 2-6 は、試料間隙を 0.5 mm として、3.0 kV の電場を印加したときの粘度挙動に及ぼす繊維長さの影響を調べた結果である。電極電圧を一定にしているため、電場強度は繊維が短くなるほど増大する。電場強度がこの ER 挙動を決定しているとする、繊維が短くなるほど、粘度が増大すると期待されるが、実際は逆の結果が得られている。植毛電極により顕著な ER 効果を発現させるためには、0.5~1.0 mm の繊維が必要であり、植毛繊維の間隙に存在する流体の挙動が ER 効果に密接に関連していることが伺われる。

## 2. 2. 2 植毛電極における ER 効果と流体物性との関係

前説では、通常の方法では ER 効果を示さない流体でも多数の短繊維を植毛した電極間で、直流高電場を印加すると顕著な粘度増加が起こることを示した。これは、ER 流体を用いなくてもシステムとして ER 効果を発現できることを意味している。しかし、すべての流体においてこの手法が使えるわけではない。ここでは、不均一電場における ER 挙動を支配する流体物性について検討した [8]。

用いた絶縁性液体は、シリコンオイル、フタル酸ジオクチル、酢酸リナリルなど 23 種類のオイルであり、すべてニュートン流体である。測定には、ストレスレオメーター (Haake 製 RS100) を用い、2.0 kV の直流電圧で ER 挙動を調べた。温度は 25°C である。+側電極は、レーヨン繊維を植毛仕上げした金属板であり、-側は平板電極である。繊維の長さは 1 mm、その密度は  $1\text{cm}^2$  当たり約 7000 本である。繊維先端とアース電極との試料間隙は 0.5 mm である。最初に、植毛がない平板電極で電場を印加したが、すべての液体において顕著な粘度増加は認められなかった。

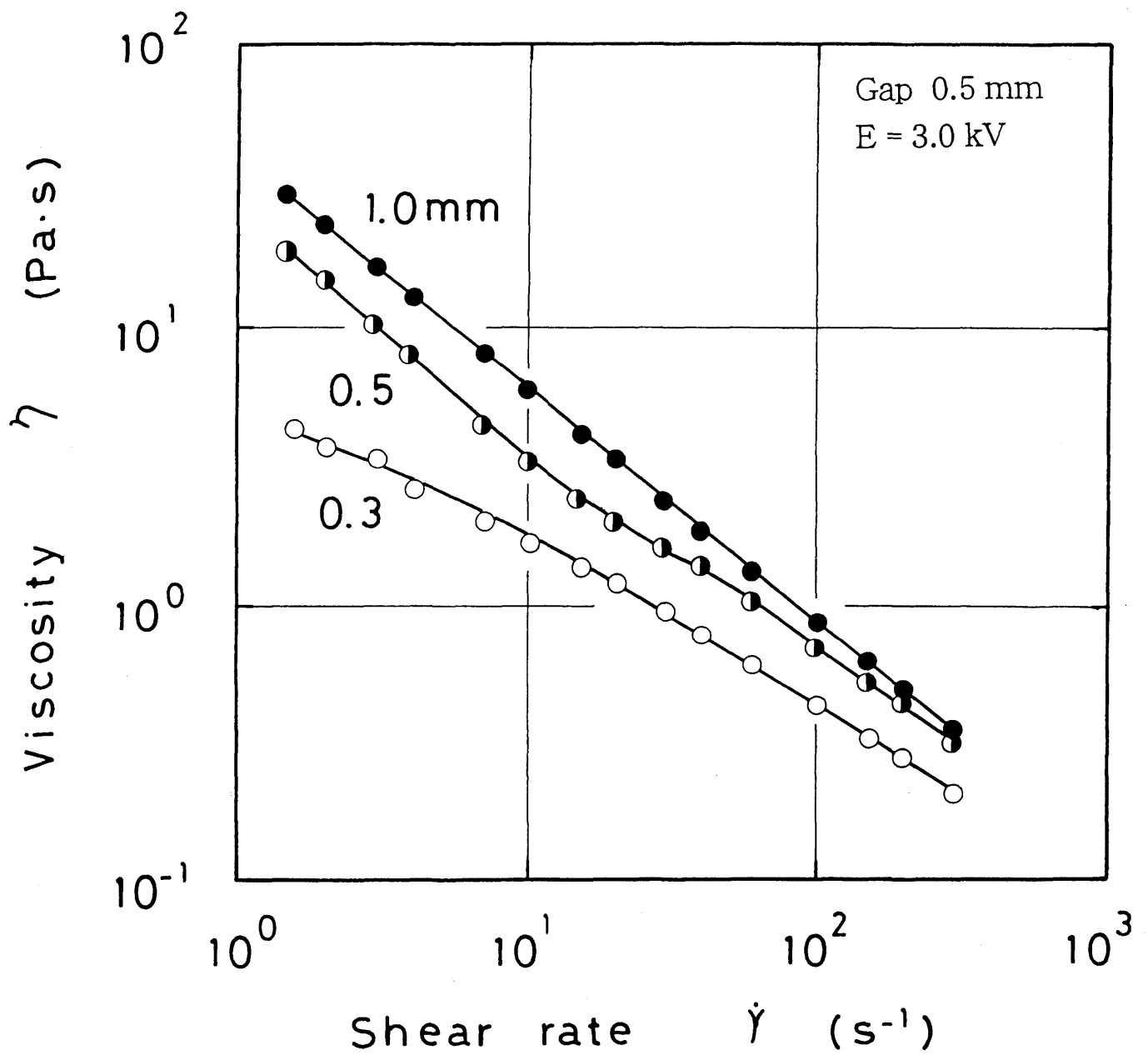


図 2-6 試料間隙 0.5mm、印加電圧 3.0kV における粘度のせん断速度依存性に及ぼす繊維長さの影響

図 2-7 は、液体の導電率とその液体を植毛電極に挟んでせん断流動を与えずに 2.0 kV の電圧を印加したときの電流との関係である。点線は、平板電極において予想される電流値であり、傾きが 1 の直線になる。しかし、プロットは傾きは 0.78 の直線となった。低導電率の液体においては、金属板をそれよりはるかに導電率の低い繊維で被覆したにもかかわらず、電気は流れやすくなっていることを示している。植毛電極中における電流値と液体の導電率との間に線形関係が成立しないという事実は、繊維先端近傍では急激な電圧降下が起こり、電場が非常に不均一であることを示唆するものである。

図 2-8 は、粘度の異なる 5 種類のシリコンオイルについて ER 効果を測定した結果である。縦軸は電場印加時の粘度  $\eta_{ER}$  を無電場の粘度  $\eta_F$  で割った相対粘度である。電場を印加すると粘度が大幅に増加するが、低せん断速度ほど粘度増加率は大きく、顕著な shear thinning 流動となる。相対粘度は無電場での粘度が低いほど高い。シリコンオイルの導電率  $\sigma$  が  $2\sim 5 \times 10^{-11} \text{ Sm}^{-1}$  の範囲でほぼ一定であることを考慮すると、ER 効果にオイルの粘度が深く関係していることが伺われる。特に、低粘度のオイルにおける流動曲線は傾きが約 -1 の直線で近似できる。これは、せん断速度によらず応力が一定であることを意味している。

われわれは、絶縁性オイルに高電場を与えると、電極からは  $1 \text{ ms}^{-1}$  以上のジェット流が吹き出していることを見出し、これを利用して誘電液体モーターを開発した。流体ジェットは EHD 効果の一種と思われる。様々な液体を用いて、このモーターの性能を調べたところ、植毛電極中で顕著な ER 効果を発現する流体ほど、高速回転することがわかった。つまり、本研究で対象とした ER 効果を決定しているのは電極から発生する流体ジェットであると考えられる。植毛電極においても繊維先端とアース電極との間に循環流が認められた。電場により誘起される流体ジェットと外部からのせん断流との相互作用の結果、

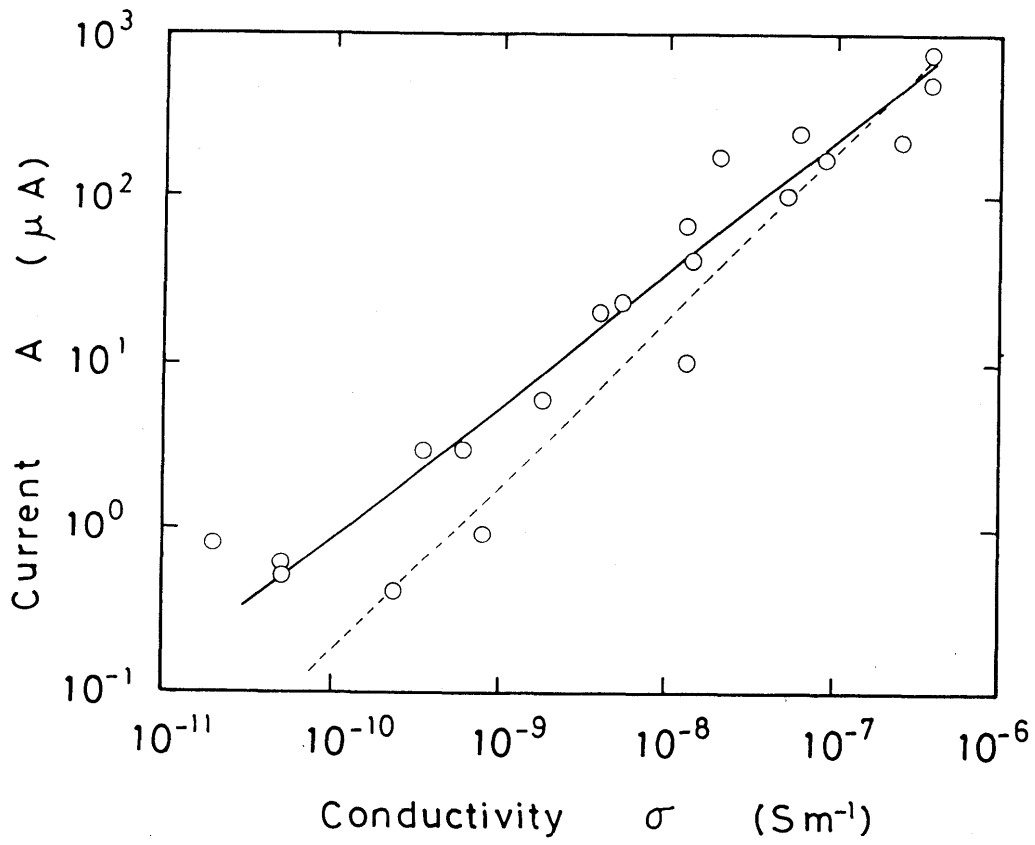


図 2-7 植毛電極間に挟まれた液体における電流と導電率と関係

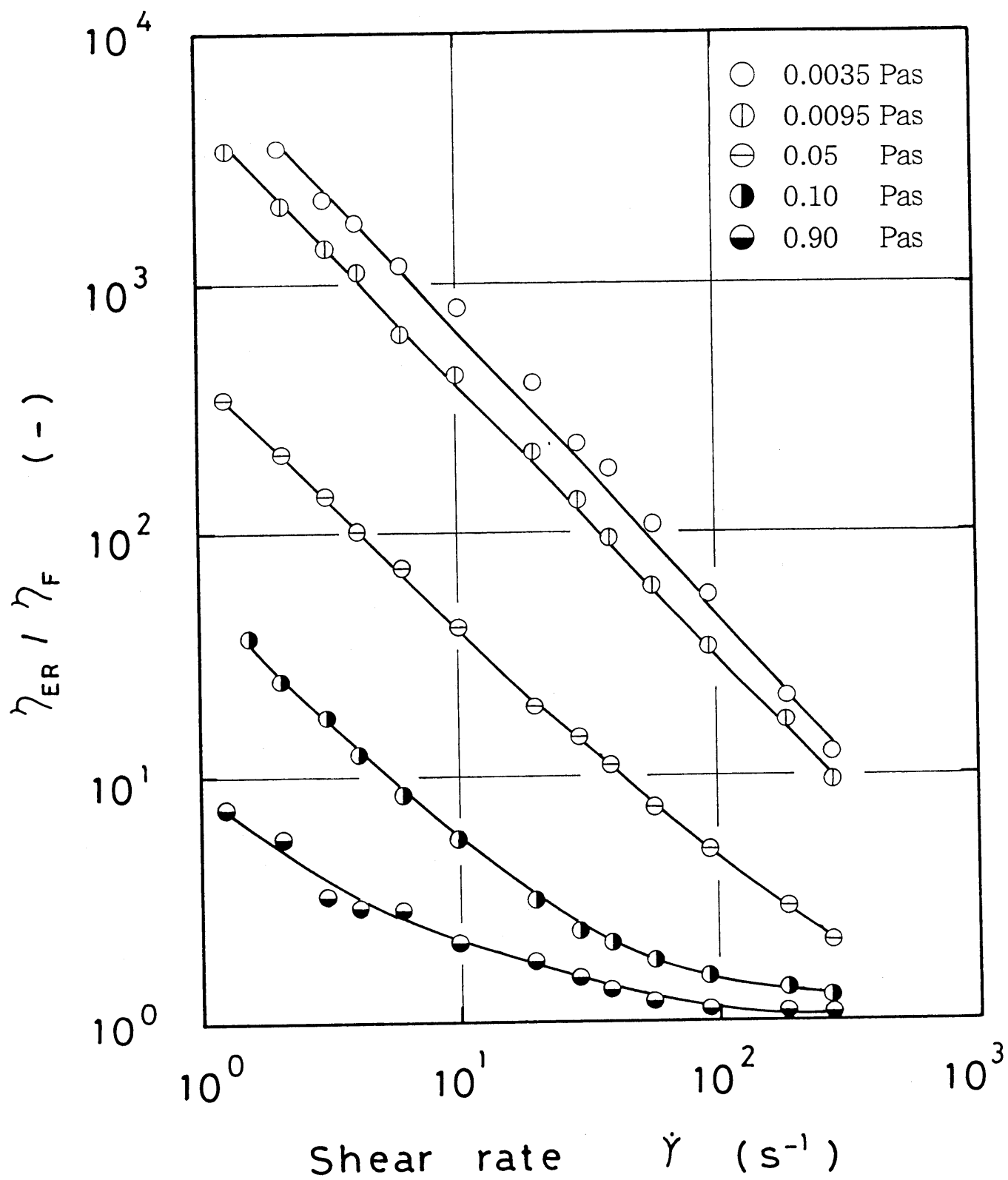


図 2-8 粘度の異なるシリコンオイルの ER 挙動

粘度増加が起こったものであり、両者は同じ機構に基づくものと考えられる。しかし、ジェット流がモータの回転運動を支配しているとすれば、低粘度、低導電率の液体ほど性能が良いはずであるが、実際にはこの領域ではモータは作動しない。植毛実験の結果、低導電率の液体は低応力で固体的な応答をすることがわかった。激しいジェット流が発生しても、循環流はある範囲に留まっている。そして、応力を与えてもある規模で循環流が保持される間は系は固体的応答を示すものと考えられる。植毛電極中では循環流の規模は小さいものと推察され、循環流の規模がモータの性能と関連しており、この結果から微小モータほど性能が向上すると予想される。以上の実験から、EHD 対流を制御することができる、新しい ER デバイスに応用できる可能性があることがわかった。植毛電極を用いた誘電液体の ER 挙動に対しては、基底粘度と導電率が重要な支配因子となっていることがわかる。それらの寄与をわかりやすく表現するため、電場強度 2.0 kV、せん断速度  $10 \text{ s}^{-1}$  における相対粘度を基底粘度と導電率の関数としてプロットしたのが、図 2-9 である。5つの領域に大別してあるが、植毛電極においては、液体の基底粘度が低いほど、そして導電率が低いほど顕著な ER 効果が現れることがわかる。

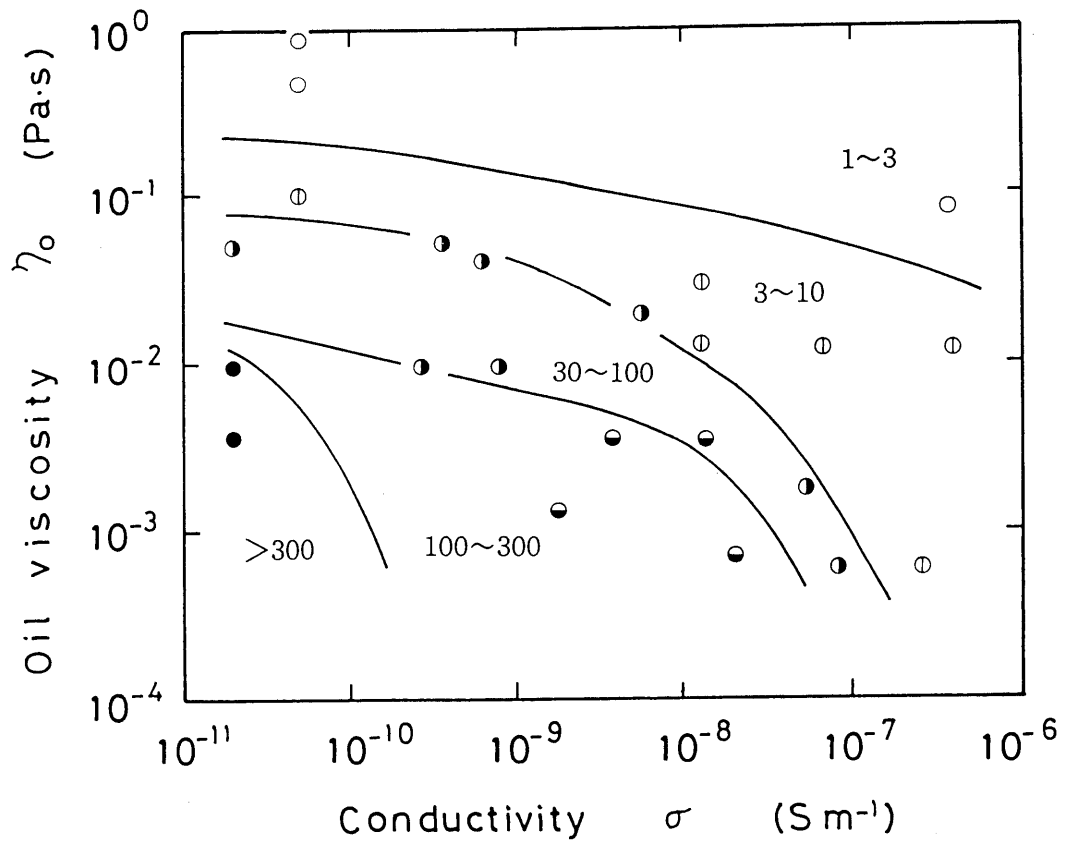


図 2-9 ER 効果と流体物性との関係

## 参 考 文 献

- 1) Y. Otsubo, K. Edamura , *Appl. Phys. Lett.*, 71, 318(1997)
- 2) W. M. Winslow, *J. Appl. Phys.*, 20, 1137(1949)
- 3) H. Block, J. P. Kelly, *J. Phys. D Appl. Phys.*, 21, 1661(1988)
- 4) I. K. Yang, A. D. Shine, *J. Rheol.*, 36, 1079(1992)
- 5) M. Fukumasa, K. Yoshida, S. Ohkubo, A. Yoshizawa,  
*Ferroelectr.*, 147, 3959(1993)
- 6) Y. Otsubo, K. Edamura , *J Non-Newtonian Fluid Mech.*,  
71, 183(1997)
- 7) Y. Otsubo, K. Edamura , *Rheol Acta*, 37, 500(1998)
- 8) Y. Otsubo, K. Edamura, *Rheol. Acta*, 38, 137(1999)

### 3. 本 研 究 の 成 果

本研究は、高電場下における絶縁性流液体の流動学的基本挙動を現象論的に把握し、液体物性と関係づけて EHD 流動の発生メカニズムを定量的に解明することを目的とする。さらに、その基礎研究に基づき EHD 流動の制御法を確立し、新規な流体素子を開発するとともに、その機能を実用レベルまで向上させ新しい技術として構築することを目指すものである。作動液体調製、要素設計、システム評価を連動しながら、基本原理の解明から実用デバイスの開発までをシステムティックに展開する総合研究の基礎を担うものである。したがって、本研究は流体ジェットの流れパターンに関する基礎研究と流体デバイスへの展開に関する応用研究とからなる。流体ジェットの応用としては、ポンプやチューブレスサイフオンのような輸送デバイス、潤滑素子、アクチュエータなどが考えられるが、ここでは ER デバイス、モーター、インキジェット機構に焦点を絞ることにした。

研究成果に関する本章は、

- I. EHD ジェット流発生機構に関する現象論的研究
- II. 純液体の ER 効果および植毛電極を用いた ER バルブ
- III. 液体モーターの性能と小型化
- IV. 新規インキジェット機構の開発

の 4 節から構成されている。なお、本章では、すでに学会誌などに公表されている研究成果についてはオリジナル論文のコピーを、投稿中のものについてはその草稿をそのままの形で掲載した。

## I. EHD ジェット流発生機構に関する現象論的研究

本研究が基盤としている現象は、高電圧下で絶縁液体中に発生する高速ジェット流である。このジェット流は交流電場では発生しない。メカニズム的には電気伝導が重要な役割を演じていると予想されるので、電気伝導という観点から検討すると以下のようなになる。

粘度が数 mPas の低分子量の液体中に存在するイオンの移動度は  $10^{-8} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  オーダーと報告されている [1, 2]。イオンの流体力学的半径を  $0.5 \sim 1.2 \text{ nm}$  と仮定すると、Stokes-Einstein の式より  $0.5 \text{ kV mm}^{-1}$  ( $10 \text{ mm}$  の電極間隔に  $5.0 \text{ kV}$ ) の電場でおおよそ  $5 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$  となる。もし、イオンの移動が媒体液体に drag 流動を引き起こし [3]、その力によりモーターが回転していると考えたと、回転速度はもっと遅いはずである。われわれが開発したモーターはその数百倍の高速で回転することから、イオンの移動が直接回転運動を起こしているとは考えにくい。前述のように誘電液体に高電圧を印加すると、対流やカオスなど液体内に二次流れが発生することがある。この EHD 対流に関するコンピューターシミュレーション (EHD は、連続の式、運動方程式、Maxwell 方程式、電荷輸送方程式により支配される非線形現象) によると、重力の作用が無視できる (microgravity conditions) 場合、電氣的レイリー数が 6000 (クーロン力が粘性力よりはるかに大きいという条件) で二次流れの速度は約  $0.02 \text{ ms}^{-1}$  と推算されている [4]。しかし、この数値もやや小さく、これまで確立されている EHD シミュレーションではローターの高速回転を説明できないようである。

そこで、流体にトレーサーとして微量の超微粉を分散して流れの直接観察を行った。図 I-1 は、ローターを外してケースに流体だけを満たして電場を印加したときの流動パターンの概略図である。+電極から-電極へ液体が高速で流動して、電極から離れた場所でそれが大きな循環流となっているのが観察された (-電極の下流にも小さな循環

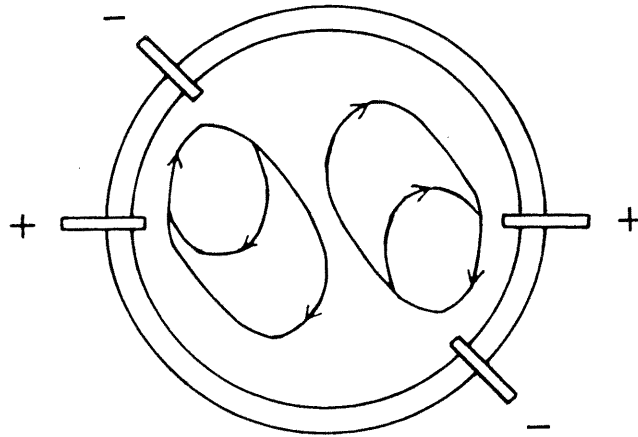


図 I-1 ローターを除去したときの流体の運動パターン

流が認められた)。電極が二組あるので循環流はも二つ発生する。ローターに回転運動を起こしてモーターとして機能している状態とは異なると思われるが、循環流は対称であり、電極近傍での流速はローターの周速度と同程度と認められた。すなわち、流体中では確かに電場により高速流れが発生しており、これがローターに回転運動を起こしていると結論できる。Yabe と Maki [5] はリング状の電極をわずかな間隙をおいて平板電極と平行に配置し、リングに数 10 kV の高電圧を印加すると、リングの中心付近で平板電極から遠ざかる方向に吹き出すジェット流が生じているのを発見した。リング周辺から引き寄せられた流体がリングと平板電極の間隙を通過した後、高速ジェットとなって飛び出すものであり、このときの流速は  $1 \text{ ms}^{-1}$  を越えることもあると報告している。ジェット流の発生機構は不明であるが、液体モーターにおいて観測された流速はこれに匹敵するものである。高電界中での液体の流動については十分研究が進んでいるわけではないので、本章ではジェット流の発生機構に注目して現象論的検討を行った。

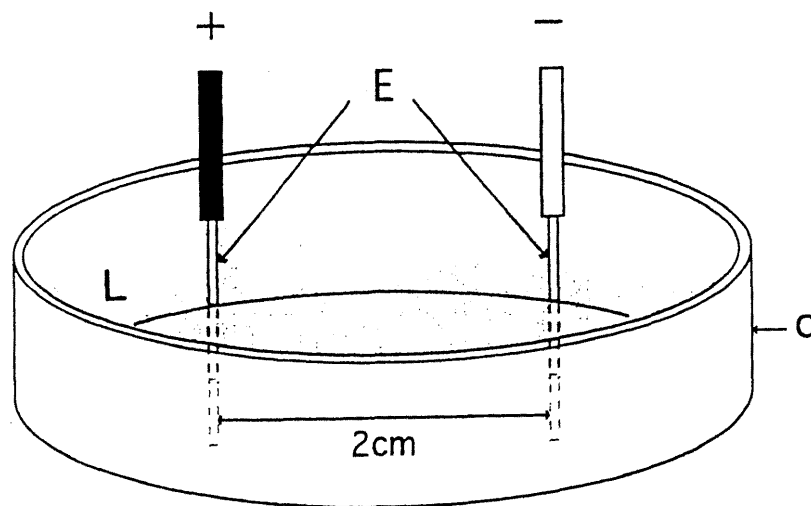
## I - 1. 針状電極間の流動パターンに関する観察

### 1. はじめに

モーターの駆動源となる液体の基本的流動は、+から-へのジェット流であるが、これがその周辺の流体の運動やローターおよび境界との干渉により回転流動となっている。これを理解するには単純な幾何学での電極近傍における流動パターンを把握することが重要である。そこで電極配置と流動パターンとの関係について検討した。

### 2. 実験

図 I-2 は最も単純な電極配置の例である。直径 12cm のシャーレに絶縁性液体を深さが 1 cm になるように満たし、その中に電極先端が 0.5cm 浸るように配置する。液体はデカン二酸ジブチルである。(導電率 $\sigma=1.35 \times 10^{-9} \text{Sm}^{-1}$ 、粘度  $\eta=7 \times 10^{-3} \text{Pas}$ ) である。電極間の間隔は 2cm とし、+側の電極に直流電圧を加え、-側はアースに接続してある。電圧を印加し、安定流動になってからの液体の流れを高速ビ



- C シャーレ
- L 作動液体
- E 電極

図 I-2 流動場測定の概略

デオにより撮影した。液体にはトレーサーとして微粒子が分散されているが、微粒子の存在が液体の流れには影響することはない。得られた画像を解析することにより、二次元の速度ベクトル分布を求めた。

### 3. 結果と考察

図 I-3 は、一対の電極を配置したときの液体表面における速度ベクトル分布を示したものである。電圧を印加すると、電極間に高速なジェット流が発生し、3秒以内に平衡速度に達した。矢印の長さが速度を表し、出発点はその流動が観測される場所を表している。全体として+電極から-電極向かって液体が流動している様子がわかる。図 I-1 では-電極側に吸い込まれるような流動となっているが、ここでは-電極からもジェット流が発生していることが確認された。

この循環流において最も速度が速いのは、+電極と-電極を結ぶ線上を+側から-側へ向かっている流れで、+電極近傍で電圧 2kV において秒速 10cm、4kV において秒速 25cm であった。電圧と流速との関係をさらに詳しく検討したところ、高速ジェット流の発生に対して臨界電圧が存在することがわかった。電極間隔が 2 cm の場合、その臨界値は 1.5kV であった。電極間隔が 1 cm の場合、臨界電圧は 1.0kV であった。また、電極を結ぶ線上の流れは電圧 2kV において  $20\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、4kV では  $55\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  であった。電場強度に換算すると、 $1\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  以上では流速と電場強度が比例することが認められた。

電極を三角形に配置したときの流動パターンを図 I-4 と図 I-5 に示す。前者は+が 1 電極、-が 2 電極であり、後者は+が 2 電極、-が 1 電極となっている。これまでの観察をベースにすると、液体の流れは+極から-極へ起こっているので、図 I-4 の配置では+極から-極へ向かって2つの分岐した流れが発生すると予想される。しかし、最も速い流れは-極の間を通過しており、その速度も 1 対 1 の電極配置のときと同じであった。液体の流れは単なる電極間移動で発生しているのではないように思われる。一方、-を 1 電極、+を 2 電極にした

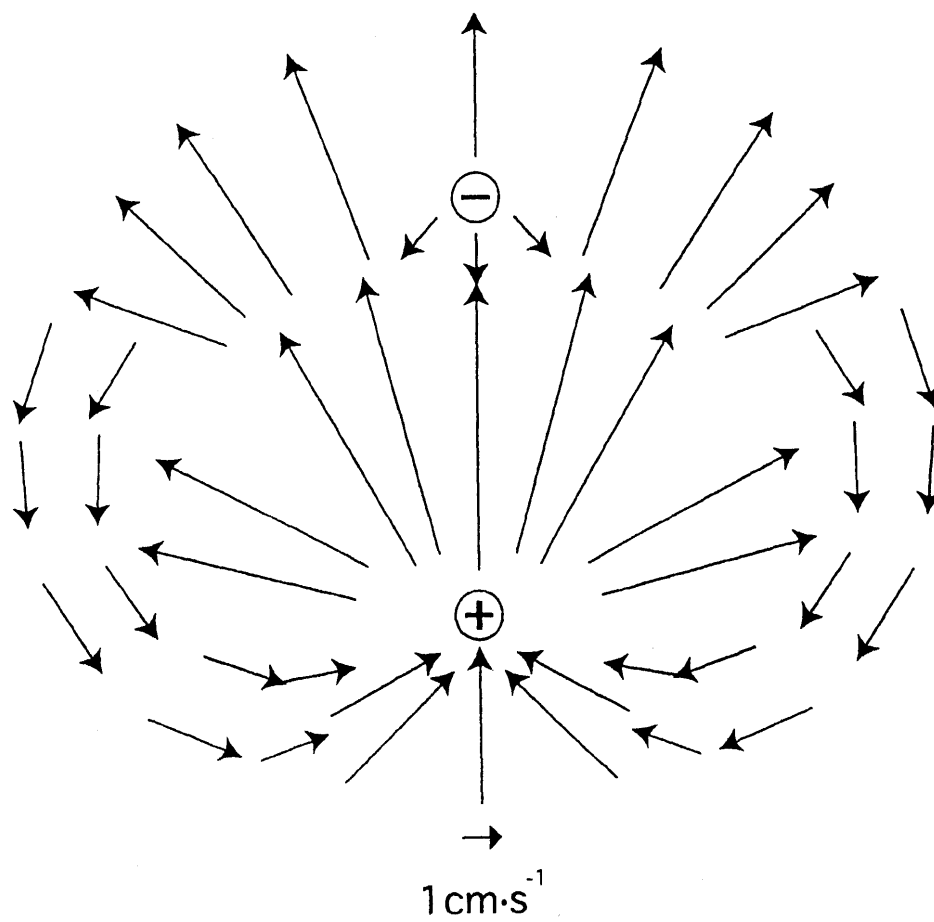


図 I-3 1 対の電極配置における流動場

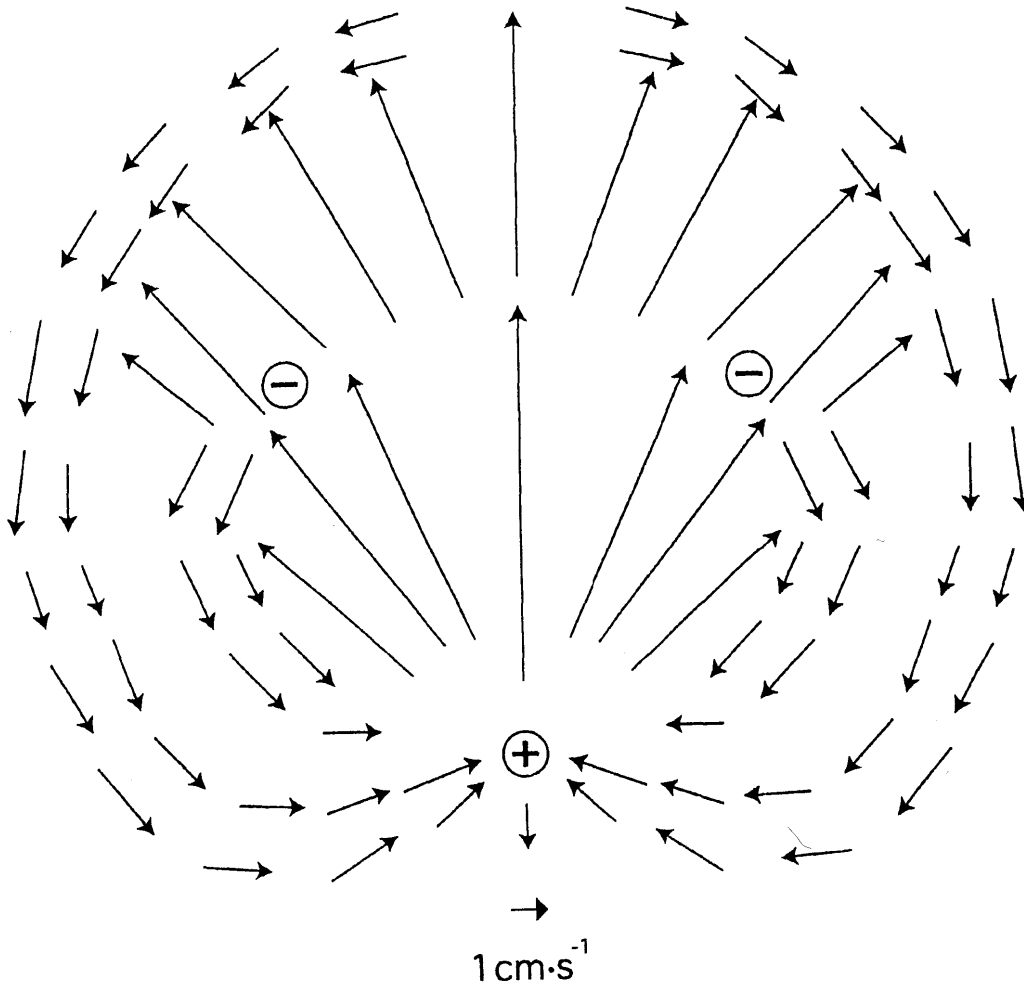


図 I-4 電極を三角形に配置したときの流動場

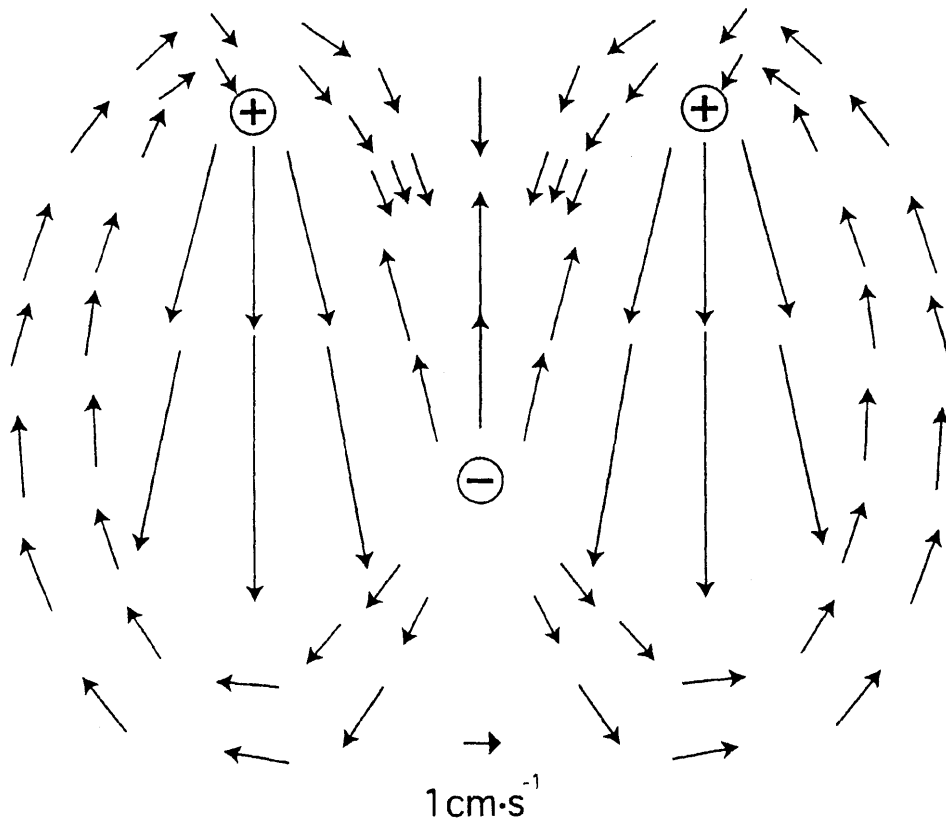


図 I-5 電極を三角形に配置したときの流動場

ときには、一極から大規模な高速流れが発生しているのが認められた。さらに+極からの流れも直接一極に向かっているのではなく、一極からの強い流れに打ち消されるかのようなパターンとなっているようである。

針状電極を用いて電場下における絶縁性液体のジェット流について画像解析した結果をまとめると以下のようなようになる。

- ①電場強度が  $1\text{kVcm}^{-1}$  以上ではジェット流の速度は電場強度に比例する。
- ②ジェット流は+極と一極の両極から発生する
- ③+極から発生するジェット流の方が一極から発生するジェット流より高速である。
- ④ジェット流は単なる電極間を結ぶ流動ではなく、電極の空間配置により複雑な流動パターンとなる。

## I-2. 電場下において液体中に発生する圧力

### 1. はじめに

絶縁性オイルに直流の高電圧を印加すると、ジェット流が発生し、大規模な循環流が形成されるが、これは電場により流体内部に圧力差が生じるために起こるものである。そして、このときの二次流れは電場が不均一電場になるほど顕著になることが知られている。この章では、不均一電場における液体の運動と発生する圧力との関係について、液体物性と関連づけて検討した。

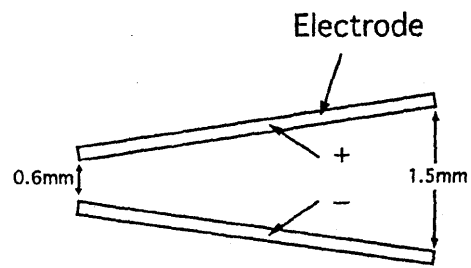
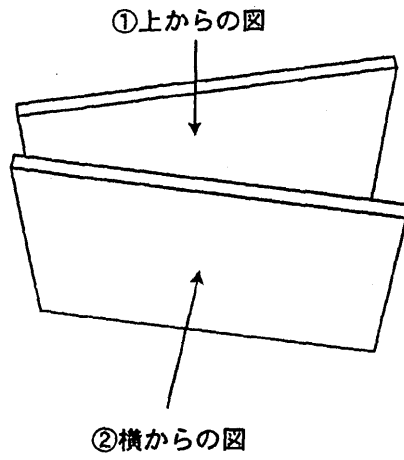
### 2. 実験

試料液体は、デカン二酸ジブチル (DBS と略記; 導電率  $\sigma = 1.35 \times 10^{-9} \text{ Sm}^{-1}$ 、粘度  $\eta = 7 \times 10^{-3} \text{ Pas}$ )、アジピン酸ジオクチル (DOA;  $\sigma = 7.8 \times 10^{-10} \text{ Sm}^{-1}$ 、 $\eta = 9.5 \times 10^{-3} \text{ Pas}$ ) および粘度の異なる (S-50;  $\eta = 5 \times 10^{-2} \text{ Pas}$ 、S-1000;  $1 \text{ Pas}$ ) 2種類のシリコンオイル ( $\sigma = 5 \times 10^{-11} \text{ Sm}^{-1}$ ) である。これらの液体は通常の条件では、絶縁性オイルとして取り扱われるものである。なお、粘度は  $20^\circ\text{C}$  で、導電率は  $2.0 \text{ kVmm}^{-1}$  で測定したものである。

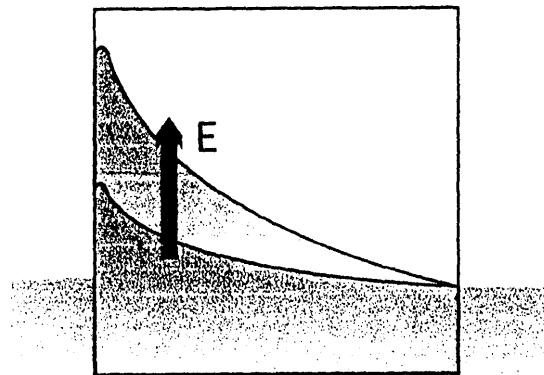
これらのオイル中に、図 I-6 に示すように液面が電極面の約半分の高さになるように透明ガラス電極を垂直に浸漬した。電極は  $10\text{cm}$  角の2枚のネサガラスを電極面を内側にして傾けて対向させたものであり、電極の最小間隔を  $0.4\text{mm}$  とし、平行に配置したものと、 $1^\circ$  および  $2^\circ$  の角度で傾けたものの3セットを用意した。電極に加える電圧は  $0 \sim 2.0\text{kV}$  の直流電圧であり、他方の電極はアースに接続されている。電場による液面の変化を測定するとともに顕微鏡下で流体内部の運動についても観察した。

### 3. 結果と考察

電圧を印加すると、すべての液体について液面上昇が認められたが、その速度はかなり速く1秒程度で平衡高さに達する。図 I-7 は、DBS について、傾き  $1^\circ$  の電極セットを用いて、液面高さと電極間隙



①上からの図



②横からの図

図 I-6 透明電極ガラスセルの構造

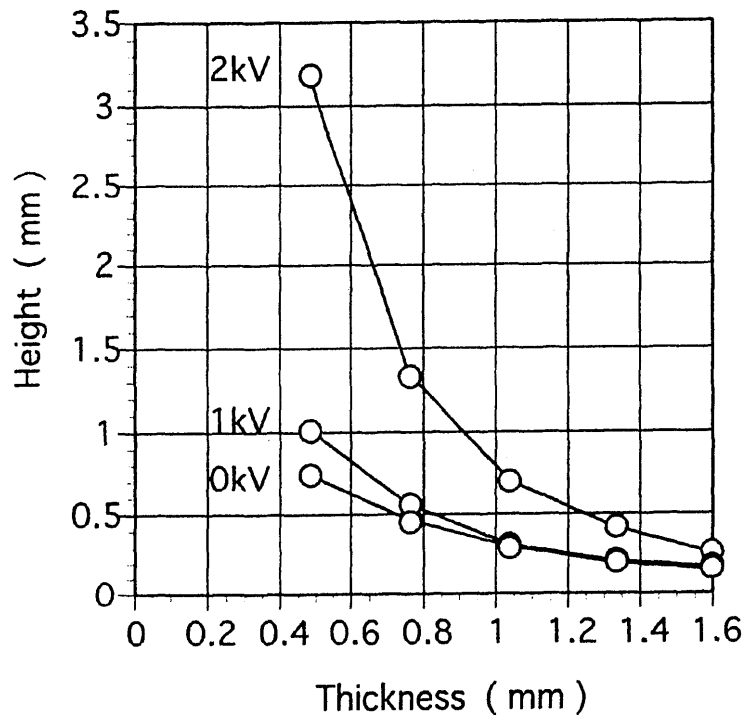


図 I-7 傾き  $1^\circ$  の電極セットにおける DBS の液面上昇挙動

との関係を測定したものであり、印加電圧をパラメーターにとって示してある。電極間隙が均一ではないので、無電場でも表面張力の効果により液面は水平とはならない。電圧が高いほど液面が高くなることがわかる。液面上昇は電場により表面張力が増大するために起こると仮定すると、これを支配しているのは電場強度と考えられる。そこで、液面上昇高さとの関係にプロットし直した。しかし、一本の曲線にまとめることはできず、この現象を電場強度で説明することは困難であることがわかった。さらに、図示してはでないが、電極間隔が最も狭い部分では電場強度が最大であるにもかかわらず、液面が下がっているのが認められた。

同じように、4種類の液体について液面高さとの関係を測定した。結果を総合すると、粘度が低いほど液面が高くなることがわかった。また、この範囲では導電率が高いほど液面が高くなることがわかった。なお、導電率に関しては、これ以外の液体についても調べており、 $10^{-7} \text{ Sm}^{-1}$  まで導電率が増大すると液面高さの上昇率が減少することを確認してある。

図 I-8 は、DBS について、液面高さとの関係を電極間角度をパラメーターにとって示したものである。図 I-7 において電場下で液面が上昇する現象を電場強度でまとめることは困難であると述べたが、さらに興味深いことは、電極が平行か、あるいは傾いているかで、異なった曲線で表されるということである。電極板の傾きは  $2^\circ$  以下と非常に小さいが、電極間隔が狭い領域で、傾いている方が平行配置より液面が高くなっている。電場が不均一になると液面上昇率が大きくなることを示している。なお、電極間の角度をこれより大きくすると、最も狭い部分で放電がおり、安定した液面とはならず、正確なデータを得るのはむずかしいと判断された。

高電圧下において絶縁液体に発生するマクロな循環流が EHD 対流であり、直流電場下における EHD 対流は液体中に存在する自由電荷の

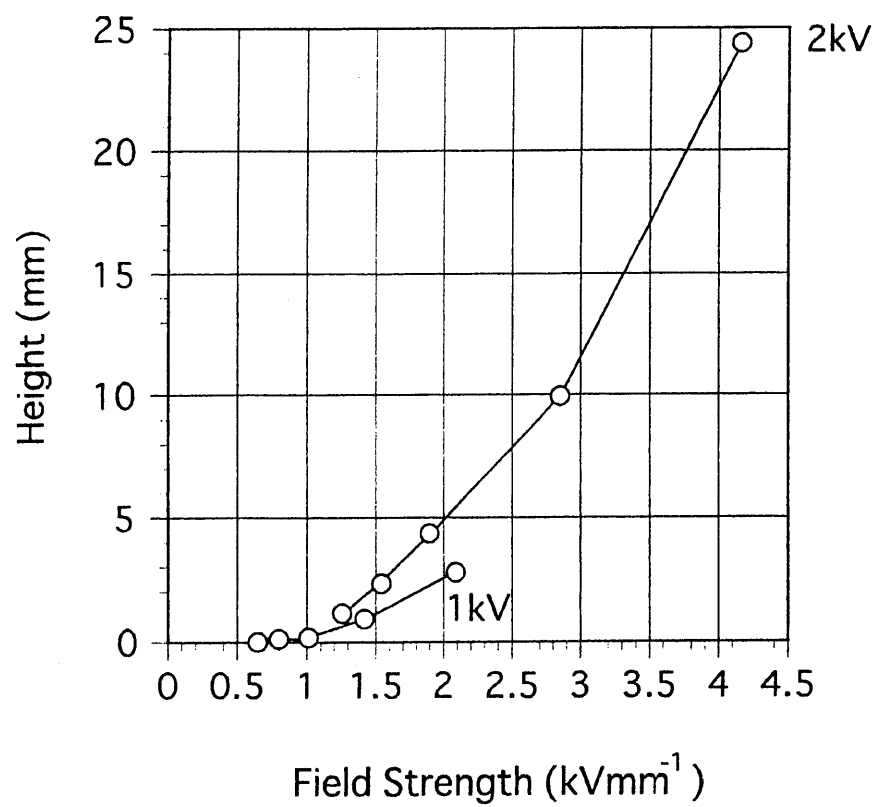


図 I-8 DBS における液面高さ と電場強度 との関係

運動によるものであることが知られている。本研究でも液面付近では大規模な循環流が発生しており、この循環流が液面を上昇させる直接の原因と考えられる。そこで、これを検討するため、液体にトレーサーを添加して内部における運動を観察した。その結果、図 I-9 に示すように上昇した液面近傍では、界面に沿って下から上に流れる緩やかな流動と、最も電極間隙が狭い部分で急激に下降する流動が観察された。液面ではガラス電極のサイズ（10cm）と同程度の大規模な循環流が発生していることがわかった。この流速は約  $0.5 \text{ cm s}^{-1}$  であった。しかし、内部はこれとは全く異なり、粒子が高速で集合と離散を繰り返していることがわかった。液体中における粒子の存在確率およびその運動が局所的に非常に不均一になっていることが観察された。その様子を模式的に示したのが図 I-10 である。透明電極板に対して直角方向から観察すると、多数の粒子が集合して、膨張収縮を繰り返しているように見える。このときのサイズは膨張したときで直径数 mm、収縮したときは約半分（0.5~1mm）で、周期は 0.5 秒程度である。また、このときの速度は  $1 \text{ ms}^{-1}$  オーダーであった。液体内部で周期的な循環流が発生していると考えられるが、粒子の集合運動のパターンは、電極の配置状態により大きく変化し、平行配置では均一分布となり、傾斜位置では、多数の集合体が電極間隔の狭い方に集合し、さらに上部で液面に近づくほど濃度が低くなるという結果が得られた。これまでの研究によると循環流はプラス電極からマイナス電極側で発生していることがわかっている。しかし、この観察結果は電場方向とは直角方向にも力が働いて、粒子の集合離散が起こっていることが伺える。ドメイン構造のサイズ、運動速度、電場強度との関係について明らかにする必要があるが、液面を上昇させる原因となる内部圧力の発生を支配しているのは、電場下における周期的循環流であると推察される。

これまで EHD 対流については、かなりの数の実験的研究およびシミュレーションがあるが、既往の研究はいずれも電場方向の流動に関す

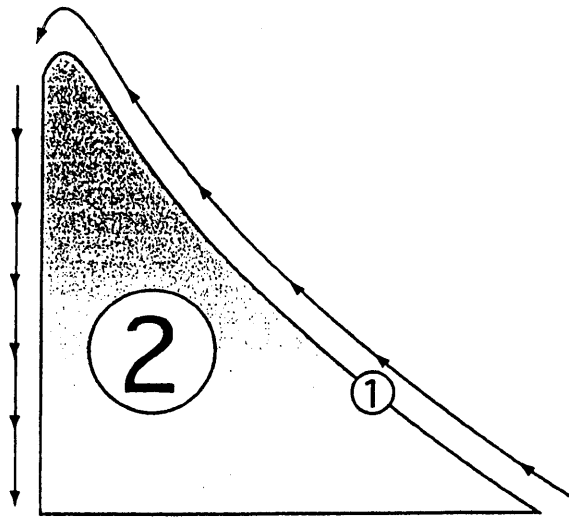


図 I-9 電場下における液面近傍の流動

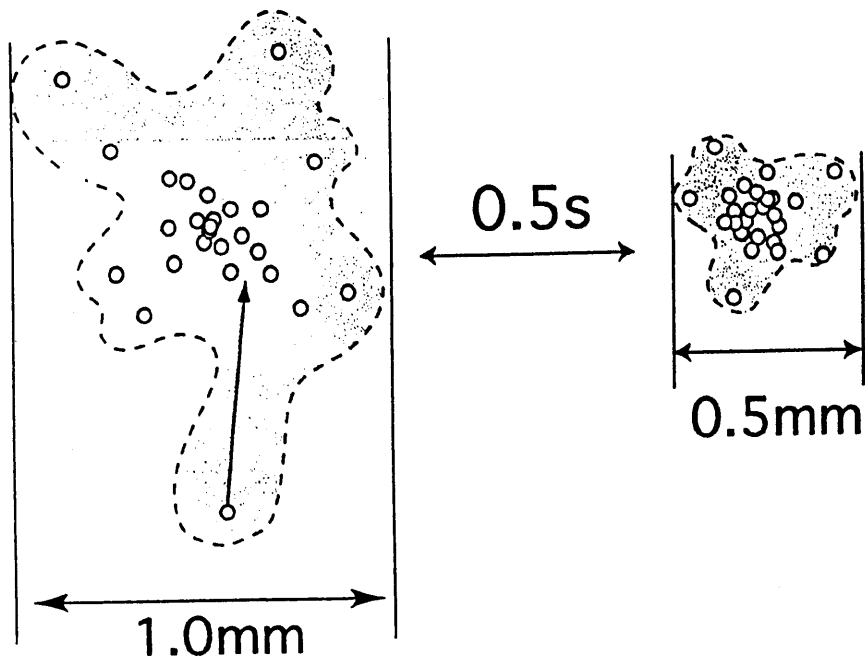


図 I-10 電場下における微粒子の集合離散運動

ュレーションがあるが、既往の研究はいずれも電場方向の流動に関する結果である。しかし、本実験はそれとは直角方向の速度が見積もられている。さらに、本実験では周期的な膨張収縮運動が観測されている。冒頭にも述べたように、われわれのこれまでの研究によると電極からは電場方向に対してジェット流が発生し、その速度は秒速1mのオーダーであることがわかっている。液面上昇を単純なEHD対流だけで説明するのはむずかしいと思われる。これを理解するためには、電場と直角方向に働く力とそれに起因する液体要素の運動を三次元的に解析する必要がある。

#### 参考文献

- 1) J. P. Gosse, *NATO ASI Ser B*, 193, 503(1988).
- 2) S. Yasufuku, T. Umemura, T. Tanii, *IEEE, Trans. Electr. Insul.*, EI-14, 28(1979).
- 3) O. M. Stuetzer, *J. Appl. Phys.*, 30, 984(1959).
- 4) M. Haga, T. Maekawa, K. Kuwahara, A. Ohara, K. Kawasaki, T. Harada, S. Yoda, T. Nakamura, *J. Jpn. Soc. Microgravity*, 12, 19(1995)
- 5) A. Yabe, H. Maki, *Int. J. Heat Mass. Transfer.*, 31, 407(1988)

## II. 純液体の ER 効果および植毛電極を用いた ER バルブ

この節は EHD ジェットにより起因する ER 効果とそれを応用した機械要素としての ER バルブについてまとめたものである。

これまでの研究で、電極に植毛して激しい EHD 対流を起こすと分散系や液晶などの構造型流体でなくても、顕著な ER 効果を発現させることができ、そのような性能をもつ流体は粘度と導電率はある限られた条件に入っていることが重要であることがわかった。これをさらに発展させると、通常の平板電極でも植毛電極と同程度の EHD 循環流を起こすことができれば、ER 効果が現れるという結論になる。図 2-9 を基にすると、導電率が  $10^{-9} \sim 10^{-7} \text{Sm}^{-1}$  にあり、粘度が  $10^{-4} \text{Pas}$  という極めて流動性の高い液体については ER 効果が現れると期待される。前半の研究は、純粋な液体について平板電極での ER 発現について検討したものである。結論としては、液晶以外で初めてこのような挙動を示す流体を調製することができた。

後半は植毛電極を用いた ER バルブへの応用研究である。これまで機械要素に分散系などの ER 流体と応用する際に条件となっていたので、電場中において十分な降伏応力あるいは粘度をもつことであった。これに対して、植毛電極を用いた ER 効果の場合、構造型流体でないため、電場下における粘度が非常に低いという特性がある。しかし、機械要素への ER 流体の応用において最も重要な点は、電場下における粘度そのものではなく、無電場における粘度に対する増加率と考えられる。つまり、この比が大きければ、電場下での粘度の絶対値が低ければ機械デバイスに応用できると考えられる。本節の後半の研究は植毛電極による ER 現象がバルブに応用できることを示したものであり、純粋液体を用いた新規 ER 機械要素を開発した。

## II-1      **Electrorheology of Dielectric Liquids<sup>\*)</sup>**

Kazuya   Edamura

New Technology Management Co., Higashi-Shinkoiwa 2-9-1-306,  
Katsushika-ku, Tokyo 124-0023, Japan

Yasufumi   Otsubo

Faculty of Engineering, Chiba University,  
Yayoi-cho 1-33, Inage-ku, Chiba-shi 263-8522, Japan

### **Abstract**

Dielectric liquids which show striking Electrorheological (ER) effect are formulated by controlling the conductivity. Although the viscosity is increased on the application of DC fields, the flow of electrified fluids is Newtonian in contrast to ordinary ER fluids. In electric fields, the convective flow is induced over the system due to the Electrohydrodynamic(EHD) effect. The interactions between EHD convection and external shear give rise to the additional energy dissipation and in turn the viscosity increase. The ER effects of simple liquids are very attractive in application to new fluid devices.

**<sup>\*)</sup> Submitted to Applied Physics Letter**

## INTRODUCTION

A reversible and rapid change in viscosity of fluids on the application or removal of electric fields is commonly referred to as the electrorheological(ER) effect. Typical ER fluids are classified into two groups; suspensions of polarizable particles dispersed in insulating oils (1, 2) and liquid crystals including liquid crystalline polymers (3, 4). In electric fields, the ER suspensions undergo a transition from Newtonian fluids to rigid solids, but the liquid crystals show only the viscosity increase without solidification. The former is explained by the chain formation of dispersed particles in the direction parallel to the field vector and the latter by the increase of domain interactions due to the orientation of elongated molecules. Although the flow properties of electrified systems are quite different, it is generally accepted that the striking ER effects are observed for structuring fluids.

When an insulating oil is subjected to a high electric field, the secondary motion of fluid is produced by the Coulomb force acting on a free charge and dielectrophoretic force arising from the nonuniformity of the dielectric constant. The secondary motion includes convection, chaos, and turbulence, and these phenomena are known as the electrohydrodynamic(EHD) effect(5-7). The flow patterns of EHD convection is very complicated and strongly depends on the geometry of vessel, electrode arrangement, field strength, and fluid properties. The pattern of convective motion is influenced by the external shear. The interactions or cooperative motion between EHD convection and applied shear require the additional energy dissipation. Therefore, the viscosity of liquids can be increased due to their combined effects. In a previous paper (8), we have reported that an insulating oil which is sandwiched between the electrodes with flocked fabrics shows a striking increase of viscosity in DC fields. The flocked fabrics serve to enhance the EHD convection. In the present paper, the ER effect of simple liquids in uniform fields between metal

electrodes with smooth surfaces is discussed in relation to physical properties of liquids and pattern of EHD convection.

## **BACKGROUND**

The important findings in previous work(9, 11) are that the pure liquids whose viscosity hardly changes in uniform fields between metal electrodes with smooth surfaces can be ER-active when subjected to nonuniform fields. The ER effect is attributed to the EHD convection enhanced by the use of flocked fabrics. In electrodes with flocked fabrics, the current density is much higher than in a uniform field. Since the EHD convection is closely related to the current density, the viscosity behavior in DC fields is examined for many oils with different conductivity. The results can be summarized as follows: (a)The parameters determining the ER effect in electrodes with flocked fabrics are the viscosity and conductivity of oils. (b)The relative viscosity, defined as the viscosity of oil in electric fields divided by that in the zero field, increases with decreasing oil viscosity and conductivity.

The requirement is the flocked fabrics for appearance of striking ER of pure oils. However, the intrinsic mechanism is the EHD convection. If the large-scale EHD convection is induced in uniform electric fields, the pure oils are expected to show ER effects in metal electrodes with smooth surfaces. The experimental results imply that the candidates are the liquids with low viscosity and conductivity. Therefore, the attention is focused on the substantiation of the hypotheses and establishment of preparation method of simple ER liquids.

## **EXPERIMENTAL**

The insulating oils were mixtures of tri-n-butylamine and fluorinated oil (FF3 manufactured by New Technology Management). The concentration of tri-n-butylamine was in the range of 0-0.2% by weight. With increasing the

concentrations, the electric conductivity in an electric field of  $2.0 \text{ kVmm}^{-1}$  increases from  $2.5 \times 10^{-9}$  to  $1.4 \times 10^{-7} \text{ Sm}^{-1}$ . All oils were Newtonian with a viscosity of  $4 \times 10^{-4} \text{ Pas}$  at  $25^\circ\text{C}$ . The density was  $1.430 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ .

The steady-shear viscosity was measured in a parallel plate geometry on a stress-controlled rheometer (Haake Rheo-Stress RS100) which was improved for the ER experiments. The diameter of plates was 35 mm. A DC voltage was applied by a technique of frictionless contact to the upper plate which was insulated from the shaft. The temperature was  $25^\circ\text{C}$ .

The convective flow generated in electric fields was observed by a microscope. The oils in which a very small amount of silica particles were dispersed as tracers, were contained in a thin cell consisting of two glass plates coated with transparent ITO(indium tin oxide) electrodes. Two types of electrode set with different surfaces were used. One is a set of plain ITO electrodes. The other consists of negative(ground) electrode of ITO glass with smooth surface and positive electrode whose surface is treated with flocked fabrics. The short fibers of nylon are adhered to the ITO glass by electrostatic flock coating. Since the flocking process is made in high electric fields, the fibers are oriented in the direction perpendicular to the plate surface. In both cells, the thickness of oil layer was adjusted to 1.0 mm.

## RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows the time dependence of viscosity on the application of electric fields for the fluorinated oil without tri-n-butylamine. The ordinate is the relative viscosity which gives a measure of ER performance. While the fluorinated oil was subjected to steady shear at  $50 \text{ s}^{-1}$ , an electric field of  $1.0 \text{ kVmm}^{-1}$  was instantaneously applied and the field strength was increased stepwise at intervals of about 30s. The time required for typical ER suspensions to respond to a step increase of electric fields is reported to be 1~10 ms (9, 10). However, the viscosity increase for the fluorinated oil is

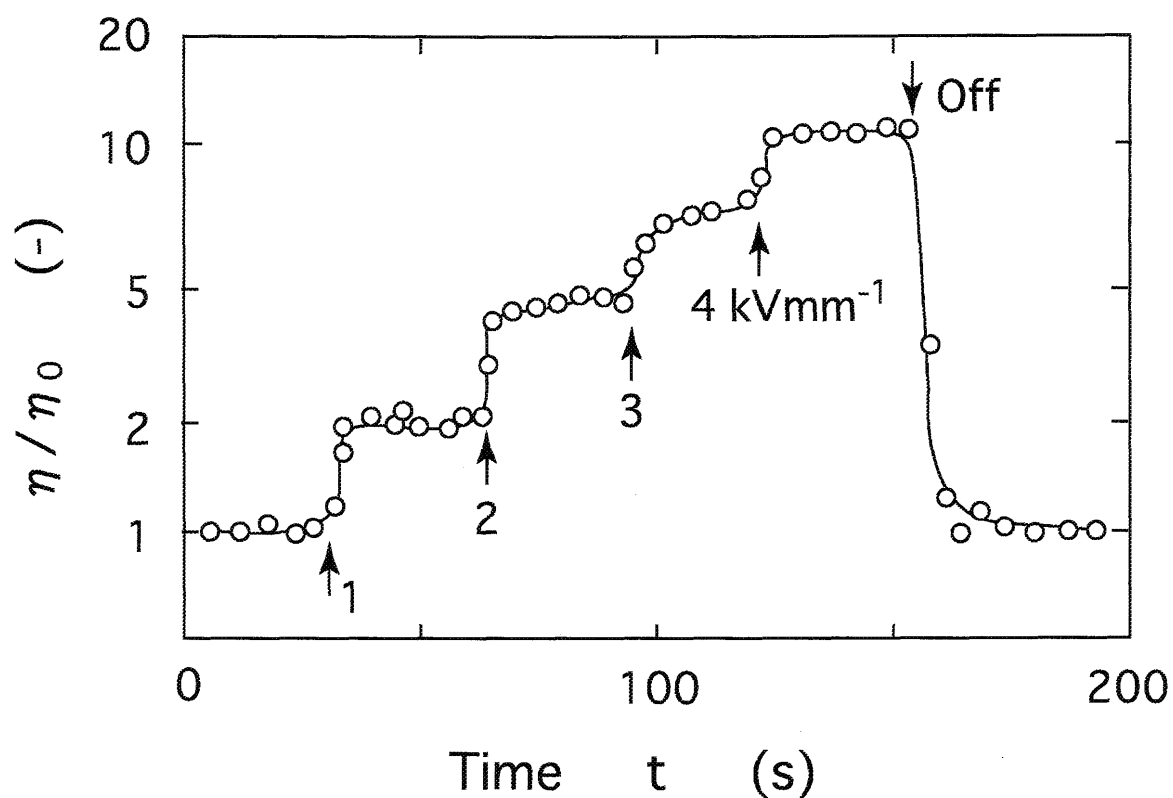


FIG. 1 Time dependence of relative viscosity on the application of electric fields for the fluorinated oil without tri-n-butylamine. Under steady shear at  $50 \text{ s}^{-1}$ , an electric field of  $1.0 \text{ kVmm}^{-1}$  was instantaneously applied and the field strength was increased stepwise at intervals of about 30s.

relatively slow. The response time can be estimated to be of the order of 10 s. The relative viscosity shows approximately linear dependence on the field strength.

Similar experiments were repeated at different shear rates. Irrespective of field strength, the flow is Newtonian in the shear rate ranges of 10~300 s<sup>-1</sup>. When dielectric fluids which are sandwiched between the electrode with flocked fabric and plane metal electrode, are electrified in DC fields, the viscosity is drastically increased and the flow behavior is converted from Newtonian to shear-thinning profiles(8, 11). In the limit of zero shear rate, a solidlike response appears and the yield stress is developed for oils with low conductivity. However, all liquids in the present study are essentially Newtonian fluids. Neither yield stresses nor elastic effects were observed.

Figure 2 shows the relation between the viscosity and the conductivity at an electric field of 2.0 kVmm<sup>-1</sup> for mixtures of fluorinated oil and tri-n-butylamine. With increasing conductivity (concentration of tri-n-butylamine), the viscosity increases at first, passes through a maximum, and then decreases. The relatively low viscosity of pure fluorinated oil may be an indication that remarkable ER effect cannot be expected for fluids with very high electric resistance. The maximum ER effect is achieved for fluids with conductivity of about 10<sup>-8</sup> Sm<sup>-1</sup>. Although the viscosity level in electric fields is considerably low compared with ordinary ER fluids, the viscosity is increased by a factor of 50.

The electrodes with flocked fabrics give rise to the shear-thinning flow profiles, whereas the oils remain being Newtonian in plain electrodes with smooth surfaces. Both effects arise from the same mechanism, that is, the interactions between EHD convection and external shear. To provide more insight into the ER mechanism induced by EHD convection, the visual observations were carried out through a microscope for oils in transparent electrodes. Figure 3 shows the schematic pictures of convective motion without external shear. In electrodes with flocked fabrics, the rapid flow is generated in parallel to the fiber direction. Since the inflow and outflow are

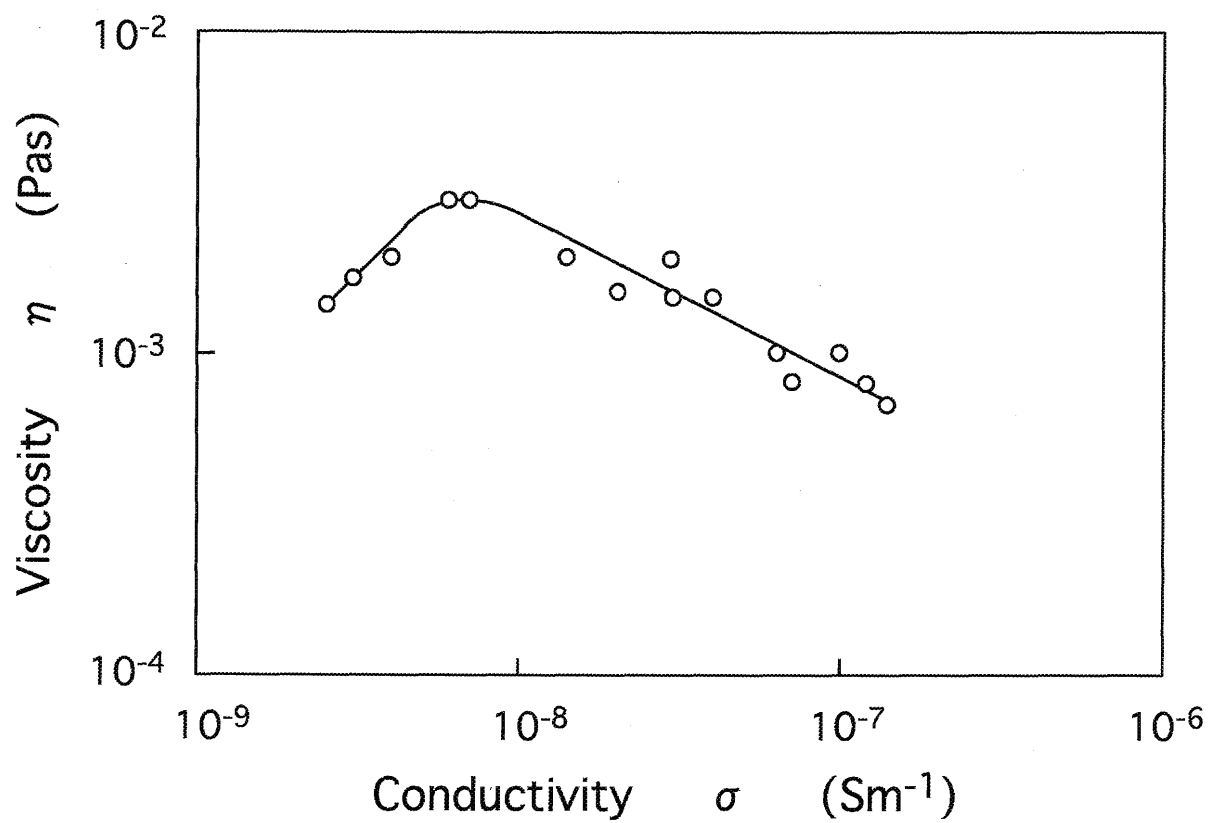


FIG. 2 The relation between the viscosity and the conductivity at an electric field of  $2.0 \text{ kVmm}^{-1}$  for mixtures of fluorinated oil and tri-n-butylamine.

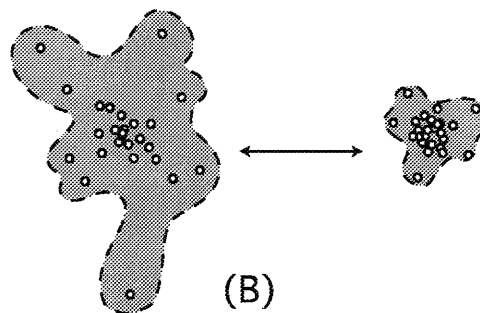
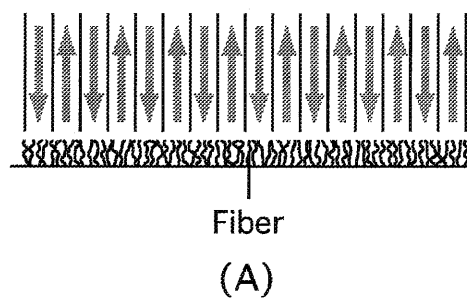


FIG. 3 The schematic pictures of convective motion without external shear. (A) In electrodes with flocked fabrics, the stable circulation flow with periodic patterns is generated. (B) In electrodes with smooth surfaces, the injection into the oil phase are momentarily and locally scattered. The flow patterns are unstable and rapidly fluctuated.

arrayed alternately, the stable circulation flow with periodic patterns may occur in the static fluid. The external shear influences the periodic circulation. However, at very low stresses the steady flow is impossible and the periodic patterns are held. As a result, the apparent solidification of simple oils occurs and the electrified oil shows a plastic response in electrodes with flocked fabrics. The periodic EHD circulation is strongly disturbed by forced shear. The superposition of different fluid motions causes the additional energy dissipation and the viscosity is markedly increased. Because of progressive rupture of periodic structures with increasing shear rate, the flow of electrified oils becomes shear-thinning.

On the other hand, it seems difficult to control the EHD convection generated from ITO electrodes with smooth surfaces. The injection into the oil phase possesses the components in both the perpendicular and parallel directions to electrode surface. In addition, the velocity vectors are momentarily and locally scattered. Therefore, the flow patterns are rapidly fluctuated. In Figure 3, a typical picture of the unstable and oscillatory motions of dispersed particles in parallel to electrode surface is shown. The expansion and contraction of convective flow repeatedly takes place at a period of about 0.5s. Although the sizes of cooperative motions are of the order of mm, the fluid elements can migrate in a long range. The structures resulting in solidlike responses are not developed and hence the oils are Newtonian in electric fields. In conclusions, it must be stressed that the ER effects of simple liquids in electrodes with smooth surfaces are very attractive in application to new fluid devices(12).

## **ACKNOWLEDGMENTS**

This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research from the Ministry of Education, Science, and Culture, Japan, for which the authors are grateful.

## REFERENCE

1. Winslow WM (1949) Induced fibrillation of suspensions. *J Appl Phys* 20: 1137-1140.
2. Block H, Kelly JP (1988) Electrorheology. *J Phys D Appl Phys* 21: 1661-1677.
3. Honda T, Sasada T, Kuroiwa K (1978) The Electroviscous effect in the MBBA liquid crystal. *Jpn J Appl Phys* 17: 1525-1530.
4. Yang I-K, Shine AD (1992) Electrorheology of a nematic poly(*n*-hexyl isocyanate) solution. *J Rheol* 36: 1079-1104.
5. Orsay Liquid Crystal Group (1971) AC and DC regimes of the electrohydrodynamic instabilities in nematic liquid crystals. *Mol Cryst Liq Cryst* 12: 251-266.
6. Suzuki M (1985) Propagating transition of electroconvection. *Phys Rev A* 31: 2548-2555
7. Worraker WJ, Richardson AT (1981) A nonlinear electrohydrodynamic stability analysis of a thermally stabilized plane layer of dielectric fluid. *J Fluid Mech* 109: 217-237
8. Otsubo Y, Edamura K (1998) Viscoelasticity of a dielectric fluid in nonuniform electric fields generated by electrodes with flocked fabrics. *Rheol Acta* 37:500-507.
9. Otsubo Y (1991) Electrorheological properties of barium titanate suspensions under oscillatory shear. *Colloids Surf* 58:73-86.
10. Tanaka K, Koyama K, Yoshida T (1992) Transient stress response of ER suspension. *J Soc Rheol Jpn* 20: 73-77.
11. Otsubo Y, Edamura K (1999) Electric effect on the rheology of insulating oils in electrodes with flocked fabrics. *Rheol. Acta*, 38:137-144.
12. Yokota S, Hirata M, Kondoh Y, Suzumori K, Sadamoto A, Otsubo Y, Edamura K (2001) Micromotor using electroconjugate fluid(Fabrication of inner diameter 2 mm RE type ECF motor). *J. Robotics Mechatronics*, 13:140-145.

植毛電極による誘導液体の粘度増加を用いた液圧制御弁\*  
(植毛 ER バルブの提案)横田 眞一\*<sup>1</sup>, 近藤 豊\*<sup>1</sup>, 石原 幸吉\*<sup>2</sup>  
大坪 泰文\*<sup>3</sup>, 枝村 一弥\*<sup>4</sup>A Fluid Control Valve by Making Use of Viscosity Increase of  
Dielectric Fluids Caused by Electrodes Planted with Hair-Like Short Fibers  
(Proposition of a Fiber Planted ER Valve)Shinichi YOKOTA\*<sup>5</sup>, Yutaka KONDOH, Kokichi ISHIIHARA,  
Yasufumi OTSUBO and Kazuya EDAMURA\*<sup>5</sup> Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology,  
4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 226-8503 Japan

Recently Otsubo and Edamura reported that dielectric fluids showed striking viscosity increase on the application of electric fields when the electrode surface was planted with hair-like short fibers. By using the phenomenon, ER effect applications are expected without ER fluids. This study aims to develop a fluid control valve with the new ER effect. In this paper, firstly, the fiber planted ER valve, which have fiber planted high voltage electrode and normal surface ground electrode, is proposed. The valve can control fluid power with applied voltage. Secondly, a 2-port fiber planted ER valve is fabricated and the static characteristics and the dynamic characteristics are examined. Finally, as an application of a fiber planted ER valve, a 4-port fiber planted ER valve is proposed and fabricated. And then, it is demonstrated that a 4 port fiber planted ER valve can control a piston-cylinder.

**Key Words:** Hydraulics, Fluid Power Systems, ER Valve, Fiber, Electrode, Experiment, Mathematical Model

## 1. ま え が き

近年, 電界または磁界など外部からの刺激に反応する各種機能性流体の一部は実用レベルに近づき, メカトロニクス分野をはじめに工学の各分野において, 機能性流体を応用した高機能, 高性能な機能要素の研究開発がおこなわれている。そういった機能性流体の一つに ER 流体 (Electro-rheological Fluids) と呼ばれる, 外部電界をかけると著しく粘性が変化する流体がある。流体制御分野において, ER 流体を作動流体とすることで, 単純構造で可動部なしに電気信号で直接, 流体の圧力および流量を制御することが可能となり, 高機能, 高信頼, 高応答な流体機械の開発が期待される。すでに, ER 流体のフルイドパワーシステムへの応用として, 圧力制御 ER バルブ, マイクロ ER バルブが報告されている<sup>(1)(2)</sup>。

従来は, 高価な液晶系 ER 流体を除けば, 絶縁油に

特殊な固体粒子を分散させた流体 (粒子分散系 ER 流体) を用いて ER 効果を発現させており, コストや分散させている固体粒子によるポンプなどへの損傷が, ER バルブ実用化への問題点として残っている。一方, ごく最近, 著者らの一部は, ER 流体を用いず, ありふれた絶縁性流体 (誘電液体) を用いて ER 効果を発現させることが可能であることを報告している<sup>(3)</sup>。そのメカニズムは明らかではないが, 繊維を植毛した電極を用いて絶縁性流体に電界を印加することで, ER 効果が発現している。この ER 効果を用いることにより, 上述の ER バルブ実用化の問題点を解決できると考えられる。本研究では, この繊維を植毛した電極による ER 効果の液圧制御弁への応用を目的とする。

本論文では, まず, 基本特性解明のために 2 ポート植毛 ER バルブを試作し, その静特性・動特性について実験的に検討し, 2 ポート植毛 ER バルブ静特性数学モデルを提案している。ついで, 4 ポート植毛 ER バルブの設計指針を 2 ポート植毛 ER バルブ静特性数学モデルをもとに検討している。最後に, 試作した 4 ポート植毛 ER バルブの基本特性を液圧シリンダ駆動実験により検討し, 4 ポート植毛 ER バルブ設計指針の有効性を確認している。

\* 原稿受付 2000年8月11日。

<sup>1</sup> 正員, 東京工業大学精密工学研究所 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)。<sup>2</sup> 東京工業大学大学院。<sup>3</sup> 千葉大学工学部 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)。<sup>4</sup> 新技術マネイジメント (〒124-0023 東京都葛飾区東新小岩2-9-1-306)。

E-mail: syokota@pi.titech.ac.jp

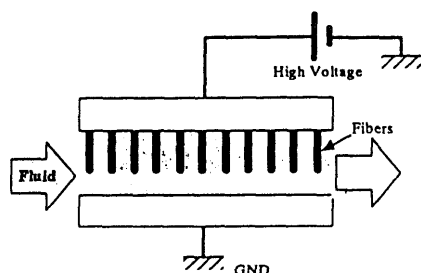


Fig. 1 Schematics of fiber planted ER valve

## 2. 植毛 ER バルブの提案

2.1 植毛 ER バルブ 本研究で提案する植毛 ER バルブの概念図を図 1 に示す。本バルブは 2 枚の平行平板電極で構成されている。高電位側電極表面は植毛仕上げされており、レーヨン繊維でジュータンのように覆われている。作動流体はこの電極間を流れる。電極間に直流で数 kV の高電圧を印加すると流動抵抗が増し(植毛 ER 効果とよぶ)、電極間通過流量が一定とすると、電極部における差圧が増加する。印加電圧による流動抵抗の変化を利用することにより、液圧制御弁が容易に実現できる。提案する植毛 ER バルブは、単純構造で可動部なしに流体を制御できるという従来の ER バルブの特長をもち、かつ従来の ER バルブが有する、粒子分散系 ER 流体を用いることによる問題点も解決できると期待される。

2.2 植毛 ER 効果メカニズム 植毛 ER 効果は、粒子分散系 ER 流体や液晶系 ER 流体の ER 効果発現メカニズムとは、全く異なるメカニズムによって生じていると考えられる。そのメカニズムはほとんどわかっていないが、本研究では、次のように考えている。

誘電液体に高電場を与えると、導電率と誘電率の不均一性に起因して流体内部に不安定流動が発生することがある。このように高電場において誘電液体にマクロな二次流れが発生する現象は、EHD(Electrohydrodynamic)効果と呼ばれている。EHD 効果は均一電場よりも不均一電場において顕著な対流が誘発されることが知られている。特に電界共役流体(Electroconjugate Fluid; ECF)と呼ばれる、誘電液体の中でも、ある範囲の物性値を有する流体においては、図 2 のように線上電極で直流を印加することにより電極近傍から活発な流動現象(ECF ジェット)が生じること(ECF 効果)が報告されている<sup>(4)</sup>。また、この効果を利用したマイクロモータなども試作されている<sup>(4)</sup>。

図 3 のような、植毛電極間の流れが観測可能な装置

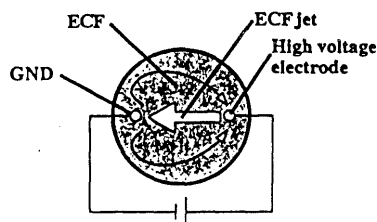


Fig. 2 Schematics of ECF effect

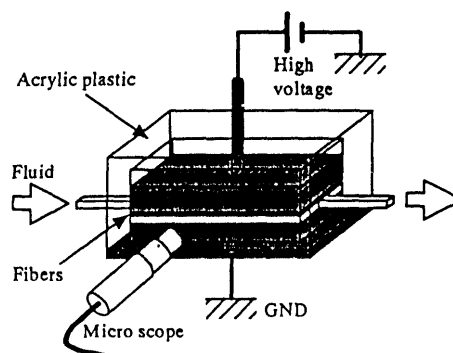


Fig. 3 Schematics of a see-through fiber planted ER valve

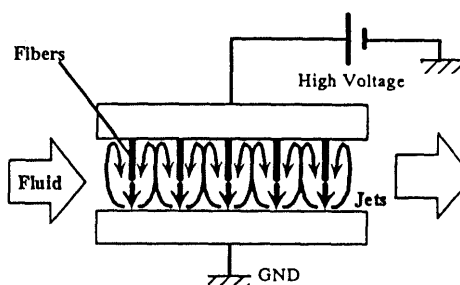


Fig. 4 Principle of ER effect with fiber planted electrodes

により、電極間の流れを観察した結果、図 4 のように、電極間で激しい流動現象が観察された。本研究では、繊維を植毛した電極間でも EHD 効果や ECF 効果と同様の現象が起こり、植毛が線状電極の代わりとなってジェットが電極間に発生し、流れに対して抵抗が生じて、ER 効果が発現しているのではないかと考えている。

## 3. 植毛 ER バルブ基本特性

3.1 2 ポート植毛 ER バルブ 基本特性を測定するために試作した 2 ポート植毛 ER バルブの概略図を図 5 に示す。写真を図 6 に示す。バルブは平板上に

繊維が植毛された高電位電極と、平板のグランド電極のみで構成され、電極の大きさは、幅50mm、長さ290mmである。電極間隔はスペーサーを交換することにより1.1mm、1.3mm、1.5mm、1.9mmのいずれかを設定できる。ここで電極間隔とは金属プレートの間隔を指す。高電位電極の植毛繊維の写真を図7に示す。高電位電極には、直径17 $\mu$ m、長さ1mm程度のレーヨン繊維が8000本/cm<sup>2</sup>程度の密度で植毛されている。ちなみにレーヨン繊維と導電性のあるグラファイト繊維を混合した植毛電極も試作したが、放電しやすく安定した電界を印加することができなかった。ただし、グラファイトを混合することでER効果は、大きくなる傾向が見られた。

図8に実験に用いた液圧回路図を示す。差圧は、バルブ上流および下流に設けた圧力変換器で、電極間通過流量はバルブ下流に設けたオーバル式流量計とストップウォッチで、油温はサーミスタで、それぞれ測定する。実験においてはそのほかに印加電圧、電流を測定している。電流はバルブへの電界印加回路のグランド側に抵抗を挿入しその電位差から測定する。

3・2 静特性 植毛ER効果は、印加電圧0kVでの差圧を基準とした、差圧の増加割合  $\epsilon_{ER}$  を

$$\epsilon_{ER} = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_0} \dots\dots\dots (1)$$

と定義し、評価する。ここで、 $\Delta P_e$ は有電界時の電極上下流間の圧力差、 $\Delta P_0$ は無電界時の電極上下流間の差圧である。電界強度は印加電圧を電極間隔で除したものをを用いる。また、作動流体としては、絶縁性能に優れたトランスの絶縁油としても用いられているDOD-101(デカン二酸ジオクチル、粘度15mPa・s(液温30℃のとき))を用いる。ちなみに、油圧システムに用いられている鉱油系作動油(例えばISO VG 32など)を用いても植毛ER効果が発現することを確認している。ただし、植毛ER効果の大きさはDOD-101に比べ小さい。

流量による影響：図9にER効果および電流値の流量変化に対する測定結果を示す。ここで、電極間隔は1.5mmである。図9より、植毛ER効果および電流値は、ほぼ流量によらない特性であることがわかる。

電極間隔による影響：電極間隔1.9mm、1.5mm、1.3mm、1.1mmについて静特性実験をおこなった。結果を図10に示す。図10より、印加電界強度で評価することにより、電流値および植毛ER効果ともに電極間隔に依存しないことがわかる。

電極長さによる影響：電極長さを変化させ、植毛ER効果の変化を測定した。結果を図11に示す。こ

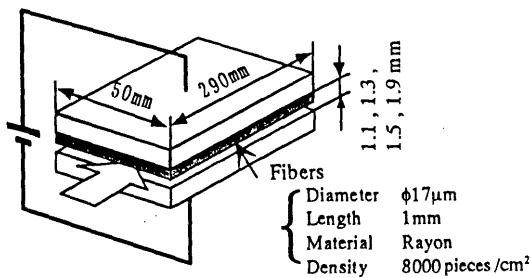


Fig. 5 Schematics of a 2-port fiber planted ER valve

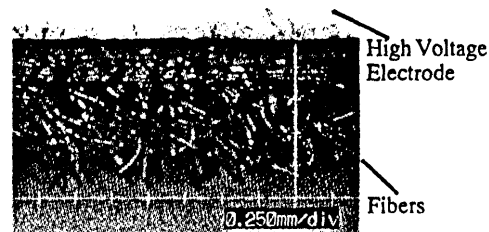


Fig. 7 Photocopy of the planted fibers

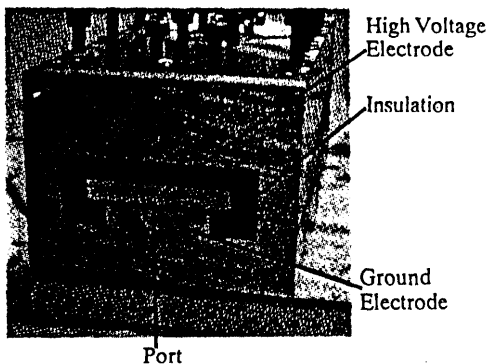


Fig. 6 Photocopy of the 2-port fiber planted ER valve

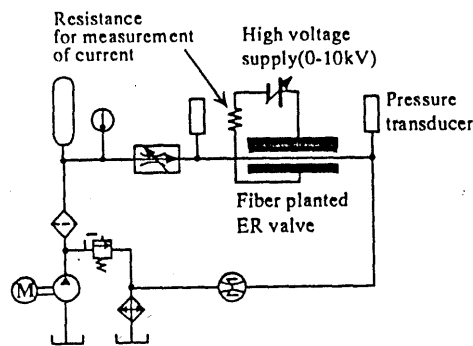


Fig. 8 Experimental hydraulic circuit

ここで電極間隔は 1.5 mm, 流量は 40 cm<sup>3</sup>/s である。図 11 より, 電極長さが短いほど植毛 ER 効果は若干小さくなる傾向にあるが, 電極長さ 145~290 mm 程度の範囲においては, ER 効果は電極長さによらないと考える。

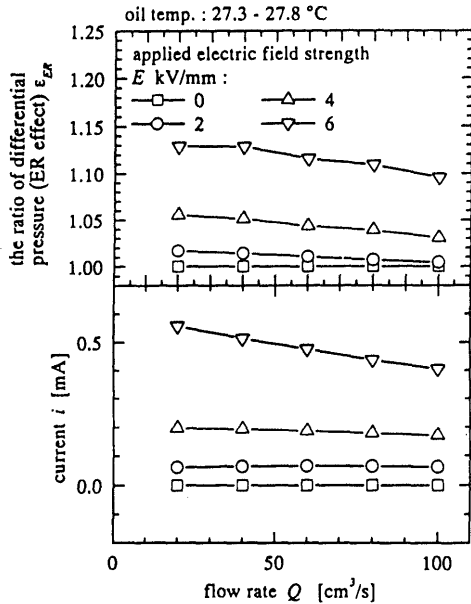


Fig. 9 Static characteristics between ER effect and flow rate, and between current and flow rate

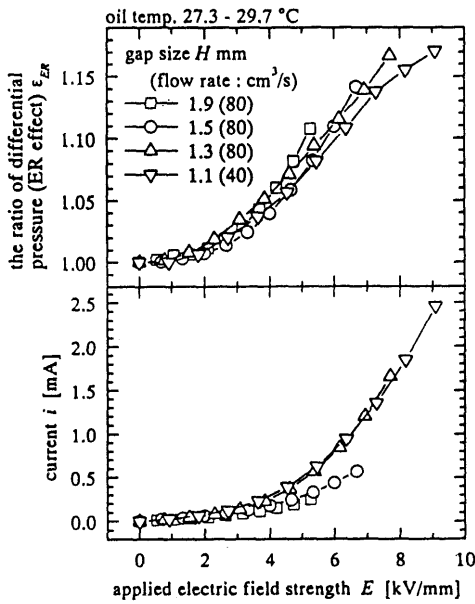


Fig. 10 Comparison of static characteristics on gap size

3.3 静特性数学モデル 無電界時において, 電極間の流れが平行平板間のハーゲンポアズイユ流れであると仮定すると, 差圧  $\Delta P$  は,

$$\Delta P = \frac{12\mu L}{WH^3_{flow}} Q \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。ここで,  $Q$  は電極間通過流量,  $\mu$  は粘度,  $H_{flow}$  は植毛電極間流路の有効高さ,  $W$  は植毛電極幅,  $L$  は植毛電極長さである。電界強度  $E$  を印加することにより  $\Delta P$  が  $\epsilon_{ER}$  倍となると考えると

$$\Delta P(E) = \epsilon_{ER} \frac{12\mu L}{WH^3_{flow}} Q \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。ここで  $\epsilon_{ER}$  は 3.2 節の各実験結果から, 電極間通過流量  $Q$ , 電極間隔  $H$ , 電極長さ  $L$  によらないとする。図 12 は各実験結果をまとめ,  $\epsilon_{ER}$  を

$$\epsilon_{ER} = 1 + kE^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

で近似した結果である。図 12 より  $\epsilon_{ER}$  は印加電界強度  $E$  の二次式で十分近似可能であり, 差圧  $\Delta P$  は,

$$\Delta P(E) = (1 + kE^2) \frac{12\mu L}{WH^3_{flow}} Q \quad \dots\dots\dots(5)$$

と表せる。式(5)を 2 ポート植毛 ER バルブの静特性数学モデルとし, 4 章での 4 ポート植毛 ER バルブ設計の際に用いる。係数  $k$  の値は作動流体や植毛条件によって変わり, 植毛による ER 効果の強弱の指標となると考えられる。以下, 係数  $k$  を植毛 ER 効果指数とよぶ。ちなみに, 本実験で用いた植毛条件(材質: レーヨン繊維, 直径:  $\phi 17 \mu\text{m}$ , 密度: 8 000 本/cm<sup>2</sup>,

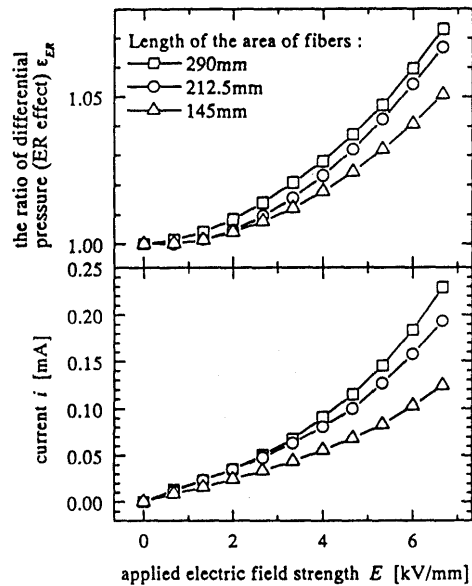


Fig. 11 Comparison of static characteristics on length of a fiber planted electrode

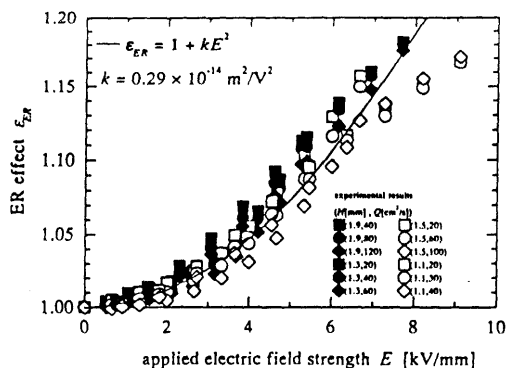


Fig. 12 Fitting curve for relation between ER effect and applied electric field strength

長さ：1 mm)および作動流体(DOD-101)の場合、 $k$ は  $0.29 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{V}^2$  となった。また、式(5)における有効高さ  $H_{flow}$  は、繊維が電極に植毛されていることから、実測値や設計値を用いることは困難である。本研究では、無電界時の差圧と流量の計測値から有効高さ  $H_{flow}$  を見積もることとする。

**3.4 動特性** 図13に試作した2ポート植毛ERバルブのステップ応答実験結果を示す。また、図14に周波数特性実験結果を示す。動特性実験に用いた電極は、静特性実験同様に長さ290 mm、幅50 mm、植毛繊維にはレーヨン(直径  $\phi 17 \mu\text{m}$ 、長さ1 mm、密度  $8000 \text{ 本}/\text{cm}^2$ )を用いている。電極間隔は1.5 mmとした。図13の結果より試作した2ポート植毛ERバルブの立ち上がり時間は60 ms、立ち下がり時間は30 ms程度であることがわかる。また、図14より試作した2ポート植毛ERバルブのバンド幅は、10 Hz程度であることがわかる。図13、14より、本研究で提案する植毛ERバルブは液圧回路のバルブとして十分なバンド幅を有していると考えられる。

4. 4ポート植毛ERバルブの試作

**4.1 構成および設計指針** 第3章で検討した植毛ERバルブの基本特性に基づき、実用的なバルブ形態として4ポート植毛ERバルブを提案および試作する。図15に4ポート植毛ERバルブの構成図を示す。4組の同一寸法の植毛電極がブリッジを構成し4ポート植毛ERバルブを実現している。それぞれ対角に位置する電極組(電極組AとD、電極組BとC)が対になっており、同じ電界を印加する。供給圧力が一定の条件下で、各対に印加する電界を変化させることにより、負荷圧力  $P_{load}$  が変化し、シリンダなどの負荷を制御することが可能となる。

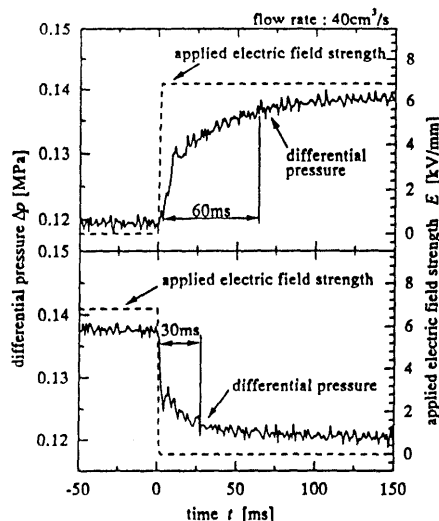


Fig. 13 Step response of the 2 port fiber planted ER valve

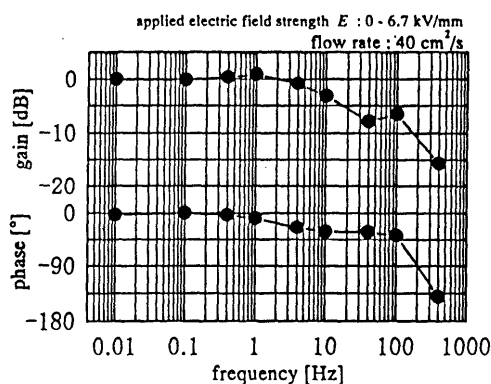
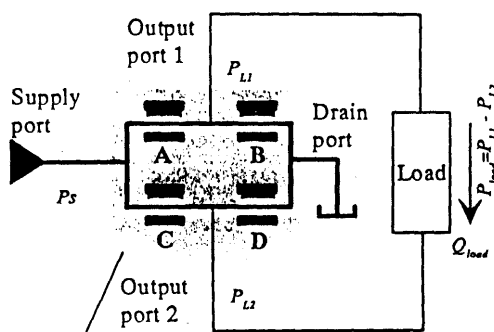


Fig. 14 Frequency characteristics of the 2 port fiber planted ER valve



4-port fiber planted ER valve  
Fig. 15 Configuration of a 4-port fiber planted ER valve

図 15 に示す 4 組のそれぞれの電極組での流量特性は式 (3) の 2 ポート植毛 ER バルブの数学モデルで表現できるとし、式 (3) をもとにして以下の手順で 4 ポート植毛 ER バルブの植毛電極寸法を設計する。設計パラメータとして最大負荷圧力  $P_{load, max}$  および最大負荷流量  $Q_{load, max}$  を考える。電極組 A および D が無電界、電極組 B および C が最大電界強度、負荷流量  $Q_{load}$  が零のとき最大負荷圧力  $P_{load, max}$  が得られることから、式 (3) を用いると

$$P_{load, max} = \frac{\epsilon_{ER, max} - 1}{\epsilon_{ER, max} + 1} P_s \dots\dots\dots (6)$$

となる。また、電極組 A および D が無電界、電極組 B および C が最大電界強度、負荷圧力  $P_{load}$  が零のとき最大負荷流量  $Q_{load, max}$  が得られることから、

$$Q_{load, max} = \frac{WH^3 H_{flow}}{24\mu L} \frac{\epsilon_{ER, max} - 1}{\epsilon_{ER, max}} P_s \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、 $P_s$  は供給圧力である。また、植毛条件は 3 章と同じとする。ちなみに、式 (4) を用いると、負荷流量を零としたときの負荷圧力、電界強度、供給圧力間の関係は、

$$P_{load} = \frac{E}{|E|} \frac{kE^2}{kE^2 + 2} P_s \dots\dots\dots (8)$$

となる。ただし、便宜上、電極 B と C の対に電界を印加するときの電界強度を正の値とし、電極 A と D の対に電界を印加するときの電界強度を負の値とする。

設計手順としては、まず、負荷の駆動条件に合わせて最大負荷圧力、最大負荷流量を決める。ついで、印加電圧の制限から自由度の低い電極間隔  $H$  (1.1~2.0 mm 間隔) を設定する。最大印加電圧および電極間隔  $H$  より、最大印加電界強度  $E_{max}$  が決まり、式 (4) より  $\epsilon_{max}$  が求まる。電極間隔  $H$  と電極間有効流路高さ  $H_{flow}$  の関係は、実験より

$$H_{flow} = 0.73H - 0.47 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (9)$$

であることから、式 (9) を用いて電極間有効流路高さ  $H_{flow}$  を求める。最後に、式 (6)、(7) を用いて電極長さ  $L$  および植毛電極幅  $W$ 、供給圧力  $P_s$  を求める。以上の手順により、4 ポート植毛 ER バルブの電極寸法を決定する。

4.2 設計 4 ポート植毛 ER バルブの試作に際して、以上の条件を設定し、電極寸法の設計を行った。

- (a) 最大負荷圧力 0.1 MPa 以上
- (b) 最大負荷流量 0.8 cm<sup>3</sup>/s 以上

この程度の特徴が得られれば、5 章の駆動実験で用いるシリンダ(受圧面積 5.4 cm<sup>2</sup>、質量 74 g)の変位を振幅 ±5 mm、周波数 0.05 Hz の正弦波状に変化させることが可能である。ただし、ピストンとシリンダ間の

クーロン摩擦は考慮していない。4.1 節の設計手順に従い、上記条件を満たす電極寸法を設計し、電極間隔  $H=1.3$  mm、電極幅  $W=0.5$  mm、電極長さ  $L=500$  mm、供給圧力  $P_s=1.8$  MPa とした。ただし、流体粘度  $\mu$  は粘度計による実測値から 15 mPa·s (液温 30°C のとき)、最大印加電圧は 9.5 kV とした。この場合、最大差圧増加割合  $\epsilon_{ER, max}$  は 1.15、電極間有効流路高さ  $H_{flow}$  は 0.5 mm である。式 (6)、(7) より最大負荷圧力  $P_{load}$  として 0.13 MPa、最大負荷流量  $Q_{load}$  として 0.8 cm<sup>3</sup>/s が概算で見込まれる。

4.3 構造 試作した 4 ポート植毛 ER バルブの概略図を図 16 に示す。また、その外観写真を図 17 に示す。バルブの外形寸法は幅 85 mm、高さ 80 mm、長さ 170 mm である。バルブ内部には、幅 5 mm、長さ 125 mm、電極間隔 1.3 mm の植毛電極による流路 16 本が横 4 列、縦 4 列に配列されている。横 4 列の流路は流れに対して直列につながっており、流れが往復

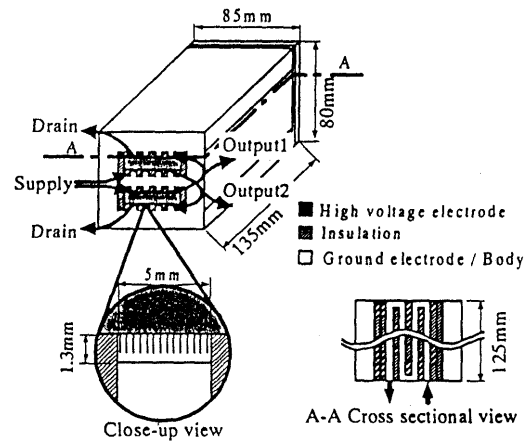


Fig. 16 Schematics of the fabricated 4-port fiber plant-ed ER valve

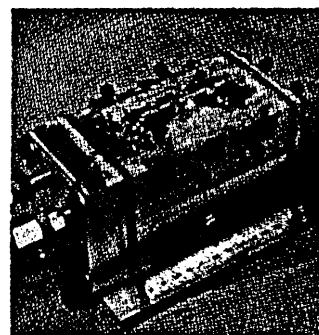


Fig. 17 Photocopy of the fabricated 4-port fiber plant-ed ER valve

するような構造になっている。横4列で一組の植毛電極となっており、合計4組の植毛電極が流れに対してブリッジを構成し、4ポートバルブを実現している。また、このような流路のつづら折り構造により、全体をコンパクトにまとめている。

5. 4ポート植毛ERバルブの基本特性

5.1 圧力ゲイン特性 図18に試作した4ポート植毛ERバルブの圧力ゲイン特性を示す。これは、出力ポート1,2をブロックし、負荷流量零の状態、印加電界強度と負荷圧力の関係を測定した結果である。ただし、便宜上、電極BとCの対に電界を印加するときの電界強度を正の値とし、電極AとDの対に電界を印加するときの電界強度を負の値としている。また、図18には、式(8)において、 $k=0.29 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{V}^2$ 、 $P_0=1.8 \text{MPa}$ とした場合の計算結果も示してある。負荷圧力の変化幅が4.2節の設計見積りおよび式(8)と比べ2倍程度の値となっている。原因としては、3章と同じ植毛条件が十分に再現されなかったことが考えられるが、本研究としては、ほぼ設計見積りと同程度の負荷圧力が得られたと考えている。植毛条件の十分な管理を行うことにより、設計見積りの精度は向上すると考える。また、図18において、中立点のずれが生じているが、これは加工および組立誤差による4組の電極組間のアンバランスに起因すると考えられる。

5.2 液圧シリンダの駆動 4ポート植毛ERバルブの出力ポートに液圧アクチュエータとして液圧シリンダを取付け、駆動実験を行った。駆動する液圧シリンダの受圧面積は5.4 cm<sup>2</sup>、ピストン質量は74 gである。実験装置概略を図19に示す。ピストン変位  $x$  をフィードバックし比例制御のサーボ系を構成してい

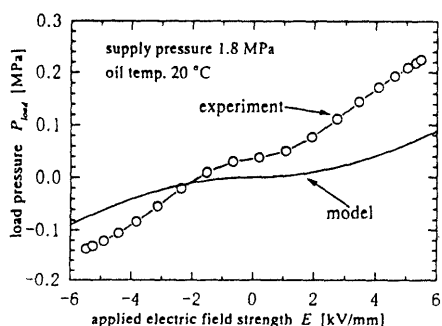


Fig. 18 Static characteristics between load pressure and applied electric field strength without load flowrate

る。印加電圧  $V$  は、比例ゲイン  $k_p$  およびオフセット定数  $V_{offset}$  を用いて、以下の式により与えられる。

$$V = -k_p(x - x_{ref}) + V_{offset} \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 $x_{ref}$  は目標変位、 $V_{offset}$  は試作した4ポート植毛ERバルブの中立点のずれを補償する電圧値である。

図20に振幅±5 mmの正弦波入力に対する応答波形例を示す。振幅±5 mm、周波数0.05 Hzの正弦波

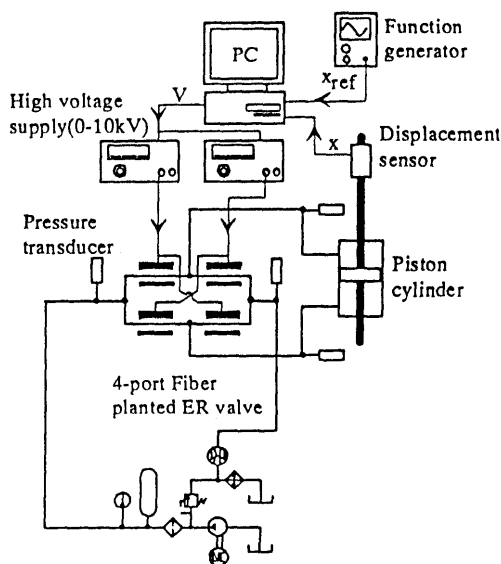


Fig. 19 Experimental set up for a piston-cylinder controlled with the 4-port fiber planted ER valve

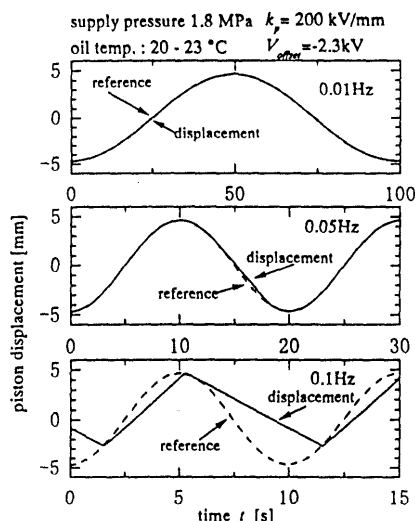


Fig. 20 Experimental results of a piston-cylinder controlled with the 4-port fiber planted ER valve

入力にピストン変位が十分追従している。また、0.1 Hzの正弦波入力に対しては、負荷流量の限界に達しているため、追従できていない。振幅 $\pm 5$  mm、周波数0.05 Hz正弦波で受圧面積 $5.4 \text{ cm}^2$ のピストンを駆動できることから、換算するとおよそ $0.85 \text{ cm}^3/\text{s}$ の負荷流量が得られていることになり、ほぼ設計値どおりの負荷流量が得られていることがわかる。なお、比例ゲイン $k_p$ およびオフセット定数 $V_{offset}$ は、それぞれ $k_p = 2 \times 10^8 \text{ V/m}$ 、 $V_{offset} = -2.3 \times 10^3 \text{ V}$ とした。

## 6. あとがき

本論文では、植毛電極によるER効果を液圧制御弁に応用することを提案し、2ポート植毛ERバルブによる静特性、動特性の実験的検討および静特性数学モデルの提案を行った。さらに、提案した静特性数学モデルを電極設計に用いて4ポート植毛ERバルブを設計および試作し、実際に液圧ピストンシリンダを制御した。得られたおもな知見は以下のとおりである。

(1) ER効果による差圧増加割合は、流量、電極間隔、電極長さにほぼ依存しないことを明らかにした。

(2) 植毛ERバルブのバンド幅は10 Hz程度であることを明らかにした。

(3) 4ポート植毛ERバルブの負荷圧力特性およびピストンシリンダ制御実験より、提案する静特性数学モデルを用いた電極設計指針の有効性を確認した。

今後の課題としては、さらなる植毛ER効果の向上を図るために、植毛条件(繊維材質、密度、長さ等)を詳細に検討する。また、経時変化を検討する、などが挙げられる。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金萌芽的研究(研究課題番号10875036)および、(財)油空圧機器技術振興財団研究助成金によって実施されたことを付記する。

## 文 献

- (1) 横田眞一・近藤豊, 電気粘性流体を用いた液圧制御弁(圧力制御弁への応用), 機論, 62-601, C (1996), 3471-3478.
- (2) 近藤豊・横田眞一, 電気粘性流体を用いた液圧制御弁(マイクロERバルブの設計と試作), 機論, 63-608, C (1997), 1192-1199.
- (3) 大坪泰文・枝村一弥, 電気流体力学的効果による誘電液体の粘度増加, 第45回レオロジー討論会講演予稿集, (1997), 195-196.
- (4) 横田眞一, 日本教史, 近藤豊, 大坪泰文, 枝村一弥, 電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ(ステータ電極(SE)形マイクロECFモータの提案), 機論, 66-642, C (2000), 627-633.

### Ⅲ. 液体モーターの性能と小型化

本節では、液体モーターの小型化とその性能について検討した。本研究で開発した液体モーターには、(1)磁場を必要としない、(2)直流で作動するので電氣的ノイズが発生しない、(3)電極を液体だけで作動するので材料を選ばない、などの特徴があり、従来の電磁モータとは全く異なる機能をもっている。さらに、(4)微小化により効率が上がるという特徴があり、これによりこれまでの電磁モーターでは困難であったマイクロモーターの製作が可能となる。ここでは、その小型化に焦点を絞っている。

誘電液体モーターはこれまでも一部の科学者の興味を引き、ときどき断片的に研究が発表されてきたようである。40年以上も前に、平行平板電極に誘電液体をはさみ、10 kV 程度の電圧を印加すると、その中に置かれた直径数 mm のガラス棒が数千 rpm で回転するという報告もなされている [1]。この現象は、ガラス棒表面に発生した電荷が反対符号の電極に向かって引きつけられることによりガラス棒がわずかに回転するとその瞬間に分極が消滅し、即座にその近傍のガラス面に新たな分極が生じるというものであり、この繰り返しで定常的な回転が起こると説明されている。この考えでは液体の導電性はガラス棒の回転運動とは直接関係をもたないことになる。これまでに報告されている誘電液体モーターは大きくても数 mm 程度である。ここで最初に試作されたモーターの直径は 3 cm であり、これまでもものとは全く異なる原理に基づくものと考えられる。

なお、この節に記載されている研究内容は、すべて学術雑誌に発表されたものであるので、次ページ以降にその発表論文を掲載する。

#### 参考文献

- 1) I. Sumoto, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 10, 494(1955)

電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ\*  
[ステータ電極(SE)形マイクロ ECF モータの提案]横田 眞一<sup>\*1</sup>, 貞本 敦史<sup>\*2</sup>, 近藤 豊<sup>\*1</sup>  
大坪 泰文<sup>\*3</sup>, 枝村 一弥<sup>\*4</sup>A Micro Motor Using Electro-Conjugate Fluids (ECFs)  
[Proposition of Stator Electrode (SE)-Type Micro ECF Motors]Shinichi YOKOTA<sup>\*5</sup>, Atsushi SADAMOTO, Yutaka KONDOH,  
Yasufumi OTSUBO and Kazuya EDAMURA<sup>\*5</sup> Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology,  
4259, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 Japan

Some kinds of dielectric fluids such as dibutyl decanedioate generate jet flow between electrodes. One of authors names the fluids ECFs (Electro-conjugate Fluids), which are considered as smart fluids. In this study, a micro motor by making use of ECF is proposed. On the proposed motor, some pairs of electrodes are located inside of a cylindrical tube (stator) filled with ECF. In the stator, rotational flow is induced by ECF jets. By taking out the rotational flow power with a rotor, micro motors are easily realized. In this paper, fabrication of micro ECF motors having I.D.  $\phi 3$  mm, I.D.  $\phi 4$  mm, I.D.  $\phi 8$  mm is described. Basic characteristics such as rotational velocity, load characteristics, output power, efficiency are experimentally examined. Also, mathematical models of the ECF motor are proposed and verified with experimental data. Finally, miniaturization characteristics are examined through the fabricated ECF motors.

**Key Words:** Micro Actuator, Dielectric Fluid, Jet Flow, Electrostatic, Micro Motor, Power Density, ECF, Smart Fluid

## 1. ま え が き

デカン二酸ジブチル(dibutyl decane-dioate)などある特有の化学構造をもつ電気絶縁性の液体に、線状電極で直流高電圧を印加すると、活発な流動が生じる現象が大坪<sup>(1)</sup>により見いだされている。その現象のメカニズムは今のところ明らかではない。これに類似の現象として、イオンドラッグによる流動、EHD対流、EHD液体ジェット、などが報告されているが、著者らはこれらとは基本的に異なる原理に基づくものと考えている<sup>(1)(2)</sup>。この流体は静電界により流体特有の性質が現れていると考えられるため、本研究ではこの流体を「電界共役流体(Electro-Conjugate Fluid, ECF)」と呼び、その応用について検討する。機能性流体の一つであるECFの流動現象をモータに応用することにより、従来にはないシンプルな構造をもち、スイッチング回路が不要な直流高電圧で駆動できるモ

ータが実現できる。

本論文では、このECFを応用したマイクロモータとして、外筒内壁に取付けられた電極から流動を発生させ、羽根形のロータが回転する構造の「ステータ電極(SE)形 ECF モータ」を提案、試作し、印加電圧と回転数の関係を実験的に検討している。また、ECFモータの基本特性を表現する簡単な数学モデルを提案している。さらに、大きさの異なるSE形 ECFモータを試作し、微小化特性について検討している。

## 2. 電界共役流体(ECF)

2-1 流体物性値との関係 電界共役流体(Electro-Conjugate Fluid, 以下 ECF とよぶ)は、機能性流体の一つであり、図1に示ように、ECFに線状の電極を挿入し直流高電圧を印加すると高電位側の電極からジェットが生じる(ECF効果)。ECF効果のメカニズムは明らかではないが、ECF効果を示す流体を、粘度と導電率でまとめると図2のようになる。図2中、ECF効果を示す流体は○で、示さない流体は×で示してある。図2より、ECF効果を示す流体には、顕著な傾向があり、粘度と導電率の間に深い関係にあることがわかる。

2-2 ECF効果 ECF流体中の線状電極への印

\* 原稿受付 1999年6月4日。

<sup>\*1</sup> 正員、東京工業大学精密工学研究所(☎226-8503 横浜市緑区長津田町4259)。<sup>\*2</sup> 正員、(株)東芝(☎210-8582 川崎市幸区小向東芝町1)。<sup>\*3</sup> 千葉大学工学部(☎263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)。<sup>\*4</sup> 新技術マネジメント(☎124-0023 東京都葛飾区東新小岩2-9-1-306)。

E-mail: syokota@pi.titech.ac.jp

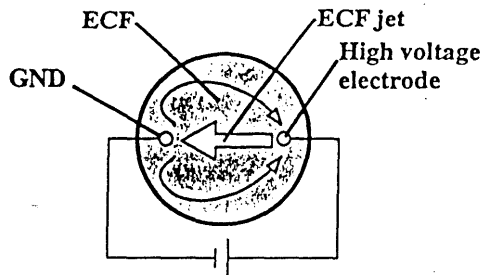


Fig. 1 Schematics of ECF effect

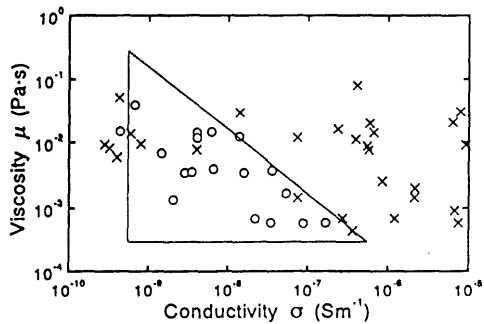


Fig. 2 Distribution of ECF and Non-ECF

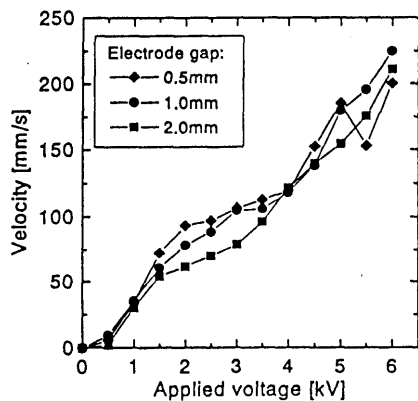


Fig. 3 Characteristics of ECF jet velocity

加電圧を変えたときの印加電圧と流速の関係を図3に示す。使用した ECF はデカン二酸ジブチルである。電極間隔は 2 mm, 1 mm, 0.5 mm である。測定位置は、高電位電極と GND 電極を結ぶ線上で、電極間隔 2 mm と 1 mm のものは、高電位電極から 0.5 mm 離れたところ、電極間隔 0.5 mm のものは、高電位電極から 0.25 mm 離れたところである。図3より、電極間隔によらず流速は、印加電圧にほぼ比例していることがわかる。図4には、図3の測定と同時に測定した電流値の測定結果を示す。図4より電極間隔が狭くなるほど、電流は流れやすくなっているのがわかる。図

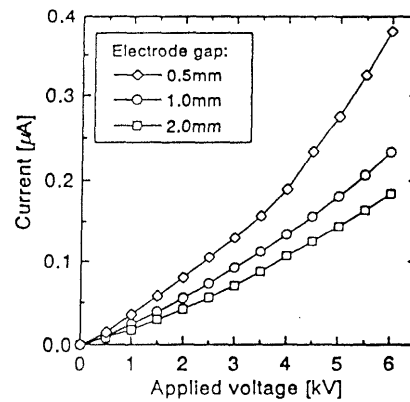


Fig. 4 Current characteristics

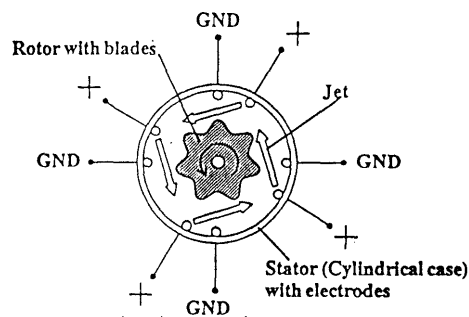


Fig. 5 Schematic Diagram of an ECF-SE Motor

3, 4の結果より、消費電流値と流速の間には相関がないことがわかり、ジェットによる電子の移動経路以外にも、電子の移動経路があると予想できる。

### 3. ステータ電極(SE)形 ECF モータ

3-1 SE形 ECF モータの動作原理 図5に本研究で提案する SE形 ECF モータの動作原理を示す。すでに2章で述べたように、ECF に線状の電極を挿入し直流高電圧を印加すると高電位側の電極からジェットが生じる。円筒形の容器の内壁に線状電極を正負が対になるように配置して電圧を印加すると、ジェットにより容器内に ECF の旋回流が形成される。この容器に羽根を有するロータを挿入することで、ECF の流れの力を回転力として取出すことができる。

3-2 内径  $\phi 4$  mm SE形 ECF モータの試作 試作した内径  $\phi 4$  mm の SE形 ECF モータの概略図を図6に示す。外径は直径  $\phi 6$  mm、長さ 9 mm で外筒部分は外径  $\phi 5$  mm 内径  $\phi 4$  mm となっている。電極対数は二対とし、電極配置は高電位電極と GND 電極がモータ中心と  $90^\circ$  をなすように配置されている。軸受にはボールベアリングを用いている。各部の素材と

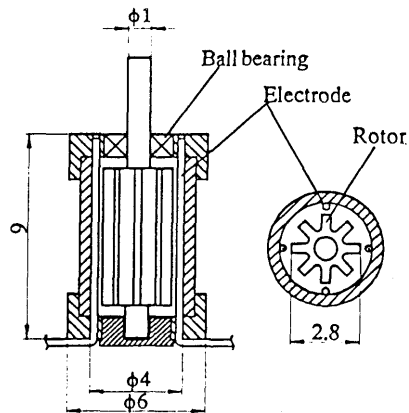
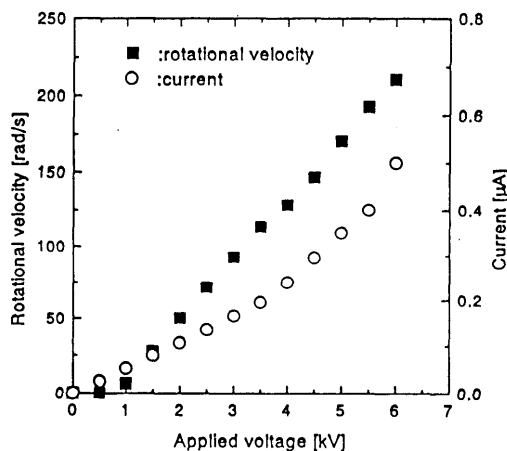
Fig. 6 Structure of SE type ECF motor (I.D.  $\phi 4$  mm)

Fig. 7 Rotational velocity and current characteristics without load

して、外筒およびロータには、エンジニアリングプラスチック (ULTEM<sup>®</sup>)、電極には  $\phi 0.3$  mm ピアノ線、出力軸には  $\phi 1$  mm 鋼材を用いている。ロータは丸棒を素材として、時計部品を加工する技術を用いて削り出して製作している。ロータ羽根枚数は 8 枚である。

**3.3 無負荷特性** 図 7 に印加電圧・回転速度間静特性および印加電圧・電流間静特性測定結果を示す。使用した ECF はデカン二酸ジブチルである。回転速度は、印加電圧にほぼ比例して増加するのがわかる。2 章で述べた、電極間の流速と同じ傾向である。印加電圧 1 kV から回転を始めているが、これは摩擦トルクの影響である。一方、電流値は二次関数的に増加しているのがわかる。この傾向も、2 章で述べた電極間流速測定実験のときの電流値と同じ傾向である。6 kV 印加時に 210 rad/s (2 000 rpm) が得られている。この程度の回転数が得られれば、マイクロモータとし

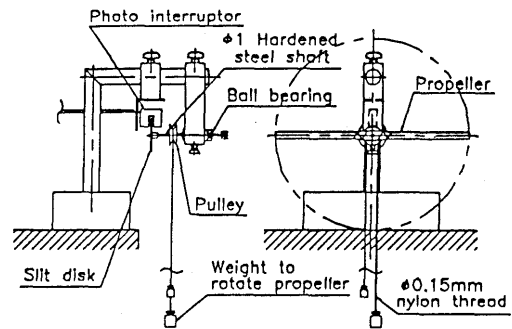


Fig. 8 Acquisition apparatus of propellers characteristics

て十分応用可能であると考えられる。さらに、回転速度が印加電圧に比例していることは、SE 形 ECF モータのサーボモータとしての可能性を示している。ちなみに、6 kV 印加時の入力パワーは、3 mW である。また、放電対策を十分行えば、さらに印加電圧を上げることは、可能であり、さらに高速回転を実現することは可能である。

#### 4. SE 形 ECF モータの負荷特性

**4.1 プロペラの回転特性を用いた微小トルク推定** 出力トルクを測定することで、試作した内径  $\phi 4$  mm の SE 形 ECF モータのパワー効率、パワー密度を検討する。しかし、試作した ECF モータの出力トルクは  $\mu$ Nm オーダの微小トルクであり、直接測定することは極めて困難である。本研究では、簡便な出力トルク推定法として、小形軽量のプロペラの回転数と回転に要するトルクの関係を用いる方法により、出力トルクを間接的に測定する。

測定原理は、まず、異種の複数のプロペラを用意し、あらかじめ、回転トルクと回転数の関係を調べておく。ついで、プロペラを ECF モータの軸に取付け、印加電圧、電流および回転数の測定を行う。結果とプロペラの回転特性から、出力トルクを推定することができる。単一のプロペラを用いると一つの印加電圧に対しモータの動作点が一つ定まるので、異種のプロペラを用いることで、さまざまな負荷に対するモータの出力測定が可能となる。

図 8 にプロペラの特性格データ取得のための装置の概略図を示す。回転トルクは、つり下げられたおもりにより発生させる。本研究ではプロペラ 8 種について、おもり 5 種を用いて各プロペラのもつ回転数とトルク間の特性を測定した。

**4.2 ECF モータ負荷特性測定結果** 上記の方法により求めた、内径  $\phi 4$  mm の SE 形 ECF モータの回

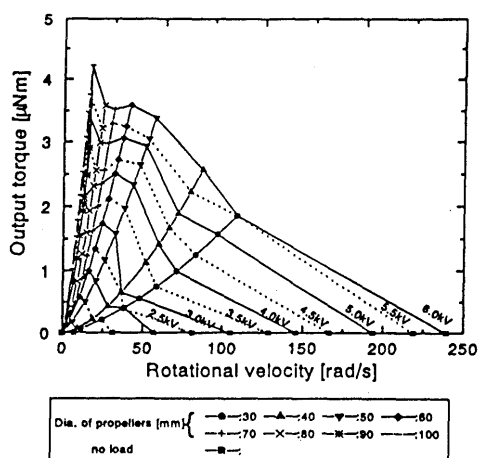


Fig. 9 Output torque characteristics (I.D. φ4 mm)

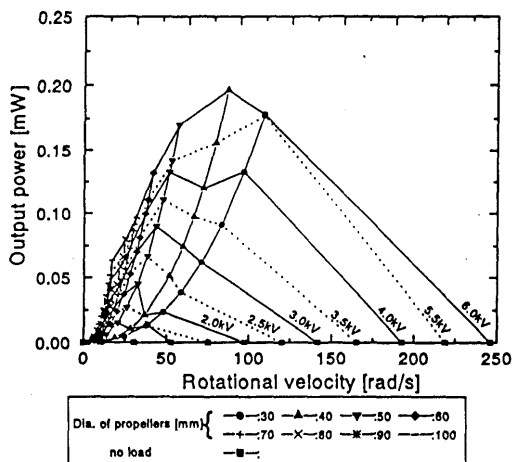


Fig. 10 Output power characteristics (I.D. φ4 mm)

回転速度・出力トルク間静特性および回転速度・出力パワー間静特性を図9, 10に示す。図9の回転速度・出力トルク間静特性は全体に右下がりの傾向があることがわかる。これは一般的な電磁モータと類似の特性である。また、トルク測定方法の原理上、回転速度が零のときの出力トルクは測定することができなかったが、ECFはロータが静止したときでもジェットを生じており、そのときにロータに与える抗力は大きいと考えられる。

図10の回転速度・出力パワー間静特性より、印加電圧一定条件で出力はある回転数でピークをもつことがわかる。6 kV印加時に最高出力0.2 mWを得ている。また、出力のピークは印加電圧の増加とともにより高回転側に現れている。

図11には印加電圧に対する電流から求めた入力パ

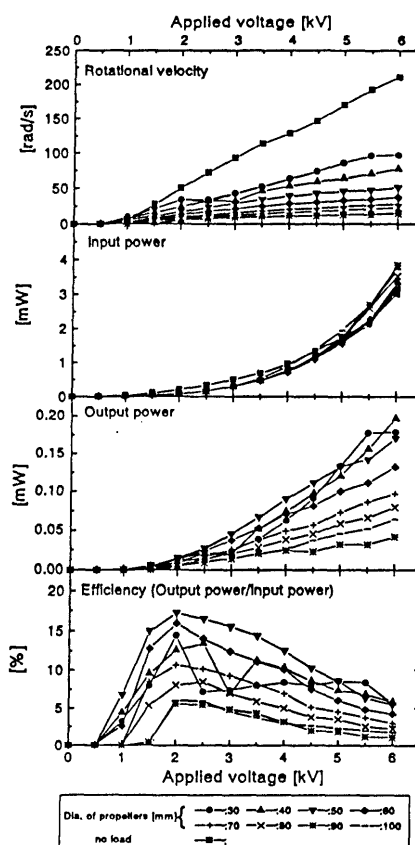


Fig. 11 ECF 4 mm Motor power Characteristics

ワー、出力トルクおよび回転速度から求めた出力パワー、それら入出力パワーから求めた効率を示す。図11より、最大効率は17%であることがわかる。現在のところ、ロータ羽根形状は単純なものであるが、ジェットからの抗力をより大きく受ける形状に、羽根車を改善することで、効率を向上させることは可能であると考えられる。また、図11の結果をみると印加電圧が上がると効率が下がる傾向にあるが、これは、2章で述べたように、消費電流中にジェットに寄与しない電流が存在し、それが増すためと考えられる。

## 5. SE形 ECF モータ数学モデル

5.1 SE形 ECF モータ数学モデルの提案 まず、SE形 ECF モータの運動方程式は、流体の粘度の影響を無視すると、

$$I\dot{\omega} = T_g - T_{out} - T_f \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで、

$I$ : ロータ慣性モーメント

$\omega$ : 角速度

$T_g$ : ECF ジェットにより発生するトルク  
 $T_{out}$ : 出力トルク  
 $T_f$ : 摩擦トルク  
 である。  
 式(1)中の ECF ジェットにより発生するトルク  $T_g$  のモデル化において、  
 ① ECF 効果により発生するジェットの平均流速は電圧に比例する、  
 ② ロータがジェットから受ける抗力は、おもにジェットの運動量変化により発生すると考え、ジェットとロータ側面との相対速度の二乗に比例する、  
 ③ ロータ上面および下面の影響は無視する、  
 と仮定すると、ECF ジェットにより発生するトルク

$T_g$  は、  

$$T_g = k_{dr}\rho r l (k_v V - r\omega)^2 \dots\dots\dots (2)$$
 と表せる。ただし、  
 $r$ : ロータ半径  
 $l$ : ロータ高さ  
 $V$ : 印加電圧  
 $k_{dr}$ : 抗力係数  
 $k_v$ : 電圧係数  
 $\rho$ : 流体密度  
 である。

また、式(1)中の摩擦トルク  $T_f$  は、回転速度によらず一定と仮定する。

以上より、無負荷時の回転数・印加電圧間静特性数学モデルは、

$$\omega = \frac{k_v}{r} V - \sqrt{\frac{T_f}{k_{dr}\rho r^2 l}} \dots\dots\dots (3)$$

となる。また、出力トルク・回転数間静特性数学モデルは、

$$T_{out} = k_{dr}\rho r l (k_v V - r\omega)^2 - T_f \dots\dots\dots (4)$$

となる。

5.2 実験結果との比較 提案する静特性数学モデル、式(3)および(4)の妥当性を検証するため実験結果との比較をおこなった。結果を図12および13に示す。用いた各係数の値は次のとおりである。

$$k_{dr} = 6.3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$k_v = 5.7 \times 10^{-5} \text{ m/s/V}$$

$$T_f = 8.4 \times 10^{-8} \text{ Nm}$$

各係数値は、実験結果と比較的一致する値を選んでいる。ただし、ロータ半径  $r$  およびロータ高さ  $l$  は試作

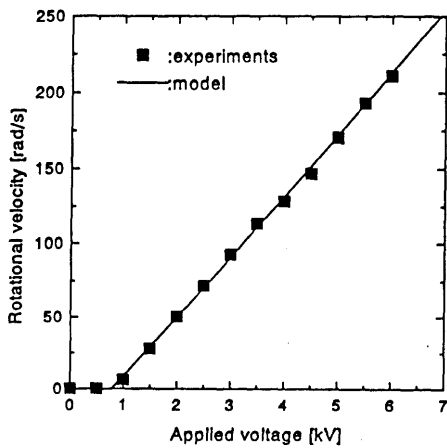


Fig. 12 Simulation results of the mathematical model for static characteristics between rotational velocity and applied voltage (I.D.  $\phi 4$  mm)

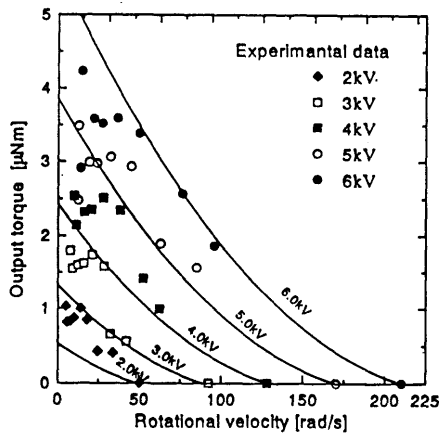


Fig. 13 Simulation results of the mathematical model for static characteristics between output torque and rotational velocity (I.D.  $\phi 4$  mm)

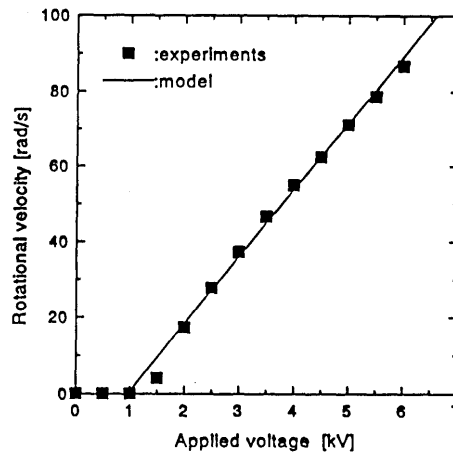


Fig. 14 Static characteristics between rotational velocity and applied voltage (I.D.  $\phi 8$  mm)

した ECF マイクロモータの実測値を用いている。また流体密度  $\rho$  はメーカのデータを使用している。具体的な値は次のとおりである。

$$r = 1.4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$l = 6.0 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho = 0.94 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

比較のために図には、実験結果もプロットしてある。図 12 および 13 より、実験データと数学モデルは比較的良好な一致を示しており、提案する数学モデルにより ECF の静特性が表現可能であることがわかる。

## 6. SE 形 ECF モータの微小化特性

### 6.1 内径 $\phi 8 \text{ mm}$ 、 $\phi 3 \text{ mm}$ ECF モータ試作 SE 形 ECF モータの微小化特性を検討するため、内

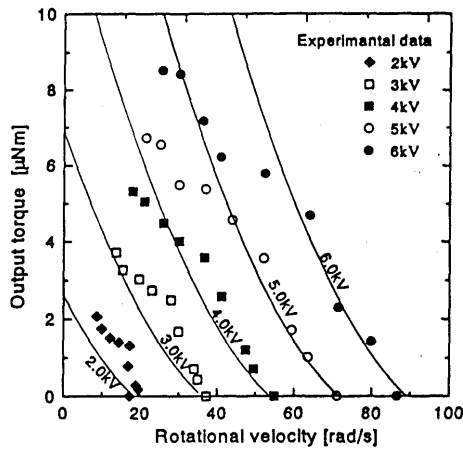


Fig. 15 Static characteristics between output torque and rotational velocity (I.D.  $\phi 8 \text{ mm}$ )

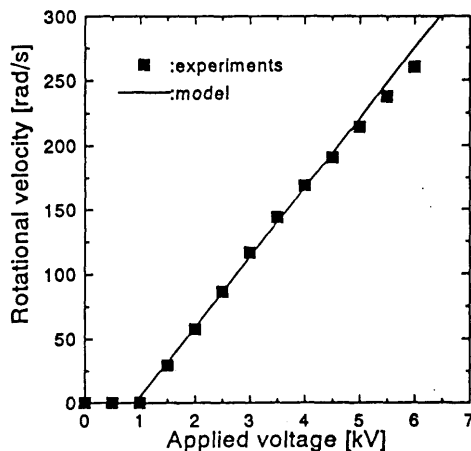


Fig. 16 Static characteristics between rotational velocity and applied voltage (I.D.  $\phi 3 \text{ mm}$ )

径  $\phi 8 \text{ mm}$  および内径  $\phi 3 \text{ mm}$  の ECF モータを試作した。構造は基本的に内径  $\phi 4 \text{ mm}$  と同じである。図 14, 15 に、内径  $\phi 8 \text{ mm}$  ECF モータの無負荷時の回転速度・印加電圧間静特性および出力トルク・回転速度間静特性実験結果を示す。また図 16, 17 には、内径  $\phi 3 \text{ mm}$  の実験結果を示す。参考までに、それぞれの図には、式(3)および(4)の数学モデルシミュレーション結果も示してある。なお、シミュレーションにおいて、各係数値は、ロータ半径  $r$ 、ロータ長さ  $l$ 、摩擦トルク  $T_f$  以外はすべて内径  $\phi 4 \text{ mm}$  と同じ値を用いている。

6.2 微小化特性 図 10, 15, 17 の実験結果をもとに、各 ECF モータの単位体積当たりの出力パワーを算出し、微小化特性をまとめた結果を図 18 に示す。論文中には示さないが、図 18 には内径  $\phi 10 \text{ mm}$  以上

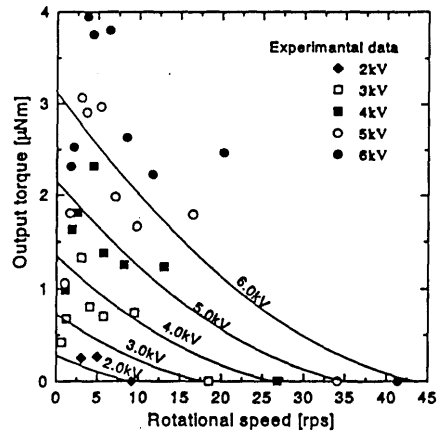


Fig. 17 Static characteristics between output torque and rotational velocity (I.D.  $\phi 3 \text{ mm}$ )

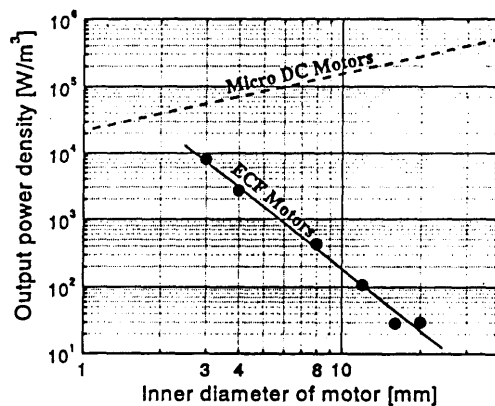


Fig. 18 Miniaturization characteristics of ECF motors for power density

の試作した ECF モータのデータもプロットしてある。図 18 より、本研究で提案する ECF モータは小形化するほど出力密度が向上することがわかり、マイクロモータに適した特性を有していることがわかる。また、図 18 には比較のために、電磁モータを小形化したときの出力パワー密度の見通しを示してある。これは、市販されている小形電磁モータの中で優れていると考えられるものカタログデータ<sup>(1)</sup>を参考にして求めたものである。提案する ECF モータをさらに小形化することにより、電磁マイクロモータより出力パワー密度の高いマイクロモータの実現が期待できる。

### 7. あとがき

本論文では、機能性流体の一つである ECF を用いて、円筒内壁面に電極を配置し旋回流を発生させることによりロータを回転させる、新しい動作原理のマイクロモータ(SE形マイクロ ECF モータ)を提案した。さらに、内径  $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm,  $\phi 8$  mm の SE 形マイクロ ECF モータを試作し実験的に検討した。得られたおもな結果は以下のとおりである。

(1) 無負荷時の回転速度は印加電圧にほぼ比例し、マイクロモータとして十分応用可能な回転速度が

得られた。(内径  $\phi 4$  mm : 210 rad/s, 2 000 rpm)

(2) 負荷特性を測定し、試作した ECF モータの出力パワー、効率を明らかにした。(内径  $\phi 4$  mm : max 0.2 mW, max 17%)

(3) SE 形 ECF モータの静特性数学モデルを提案し、実験結果との比較により、その妥当性を確認した。

(4) ECF モータは、微小化に伴い出力パワー密度が大きくなる傾向にあり、マイクロモータに適した特性を有していることを示した。

今後の課題としては、さらなる ECF モータの微小化により出力パワー密度の増大を図る、ロータ羽根形状の最適化により、高効率を実現する、経時変化を検討する、などが挙げられる。

### 文 献

- (1) 大坪泰文・枝村一弥, 誘電液体モーターの開発, 第 44 回レオロジー討論会講演要旨集, (1996), 210-213.
- (2) Otsubo, Y. and Edamura, K., Dielectric Fluid motors, *Apply. Phys. Lett.*, 71-3 (1997), 318-320.
- (3) 並木精密宝石(株), 総合技術カタログ(並木モータカタログ), 7-1, 26-41.

電界共役流体 (ECF) を応用したマイクロモータ\*  
[ロータ電極 (RE) 形マイクロ ECF モータの提案]横田 真一<sup>\*1</sup>, 根本 敏之<sup>\*2</sup>, 近藤 豊<sup>\*1</sup>  
大坪 泰文<sup>\*3</sup>, 枝村 一弥<sup>\*4</sup>A Micro Motor Using Electro-Conjugate Fluids (ECF)  
[Proposition of Rotor-Electrode (RE)-Type Micro ECF Motors]Shinichi YOKOTA<sup>\*5</sup>, Toshiyuki NEMOTO, Yutaka KONDOH,  
Yasufumi OTSUBO and Kazuya EDAMURA<sup>\*3</sup> Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology,  
4259, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 Japan

Some kinds of dielectric fluids such as dibutyl decane-dioate generate jet flow between electrodes. One of the authors calls the fluids ECF (Electro-conjugate Fluids), which are considered as smart fluids. The authors propose a micro motor by making use of ECF. In our previous paper, stator electrode (SE)-type micro ECF motors have been reported. In this study, a rotor electrode (RE)-type micro ECF motor is proposed. On the RE-type micro ECF motor, some pairs of electrodes are located on the surface of a cylindrical rotor. The rotor can rotate with the reaction force caused by ECF jets. By making use of the ECF jet's reaction force, micro motors are easily realized. Also it is expected that RE-type ECF motors have higher power and higher efficiency than SE-type ECF motors. In this paper, fabrication of micro ECF motors having I. D.  $\phi 3$  mm, I. D.  $\phi 4$  mm, I. D.  $\phi 8$  mm is described. Basic characteristics such as rotational velocity, load characteristics, output power and efficiency are experimentally examined. Also, mathematical models of the ECF motor are proposed and verified with experimental data. Finally, miniaturization characteristics and aging characteristics are examined based on the fabricated ECF motors.

**Key Words:** Micro Actuator, Dielectric Fluid, Jet Flow, Electrostatic, Micro Motor, Power Density, ECF, Smart Fluid

## 1. ま え が き

近年、マイクロマシンへの応用を目的に、さまざまな駆動原理のアクチュエータが提案されている。しかし、マイクロマシンを駆動するアクチュエータには、小形かつ高出力密度であることが要求されることから、実用的なマイクロアクチュエータは実現されていない。

一方、デカン二酸ジブチル(dibutyl decane-dioate, 以降 DBD と呼ぶ)などある特有の化学構造をもつ電気絶縁性の液体に、線状電極で直流高電圧を印加すると、活発な流動が生じる現象が著者の一人である大坪により見いだされている<sup>(1)(2)</sup>。その現象のメカニズムは今のところ明らかではない。これに類似の現象として、イオンドラッグによる流動<sup>(3)</sup>、EHD 対流<sup>(4)</sup>、EHD

液体ジェット<sup>(5)</sup>、などが報告されているが、得られる流速がこれらにくらべ高いことから、著者らはこれらとは基本的に異なる原理に基づくものと考えている。本研究では静電界により流体特有の性質が現れていると考えられるため、この流体を「電界共役流体 (Electro-Conjugate Fluid, ECF)」と呼び、その応用について検討する。機能性流体の一つである ECF の流動現象をモータに応用することにより、従来にはないシンプルな構造をもち、スイッチング回路が不要な直流電圧で駆動できるモータが実現できる。

著者らは、すでに、この ECF を応用したマイクロモータとして、外筒内壁に取付けられた電極からジェットを発生させ、羽根形のロータがジェットを受けて回転する構造の「ステータ電極(SE)形 ECF モータ」を提案、試作し、その特性について実験的に検討している<sup>(6)</sup>。

本論文では、新たな ECF モータとして、ロータに取付けられた電極からジェットを発生させ、その反力でロータが回転する構造の「ロータ電極(RE)形 ECF モータ」を提案、試作し、その特性について実験的に検討する。RE 形 ECF モータは、ジェット発生時の反力

\* 原稿受付 1999年12月1日。

<sup>\*1</sup> 正員、東京工業大学精密工学研究所(〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)。<sup>\*2</sup> (株)日立製作所(元:東京工業大学大学院)。<sup>\*3</sup> 千葉大学工学部(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)。<sup>\*4</sup> 新技術マネジメント(〒124-0023 東京都葛飾区東新小岩 2-9-1-306)。

E-mail: syokota@pi.titech.ac.jp

で直接、ロータを回転させることから、SE 形 ECF モータに比べ、高出力、高効率が可能である。

2. RE 形 ECF モータの試作

2.1 RE 形 ECF モータの動作原理 電界共役流体 (Electro-Conjugate Fluid, 以下 ECF と呼ぶ) は、機能性流体のひとつであり、図 1 に示すように、ECF に線状の電極を挿入し直流高電圧を印加すると高電位側の電極からジェットが生じる (ECF 効果)、電極間隔によらず流速は、印加電圧にほぼ比例する。図 2 に本研究で提案する RE 形 ECF モータの動作原理を示す。外壁に線状電極対を取付けたロータを、ECF を満たした円筒容器内に挿入する。電極へ電圧を印加すると電極から ECF 効果によりジェットが生じる。このジェット発生による反力によりロータは回転する。比較のため、著者らがすでに提案している、SE 形 ECF モータの動作原理を図 3 に示す。SE 形 ECF モータでは、円筒形の容器の内壁に線状電極を正負が対になるように配置する。電極へ電圧を印加すると、ジェットにより容器内に ECF の旋回流が形成される。この容器に羽根を有するロータを挿入することで、ECF の流れの力を回転力として取り出すことができる。

SE 形 ECF モータは、ジェットによる旋回流を利用してロータを回転させているのに対し、RE 形 ECF モータは ECF 効果により、直接ロータを回転させてい

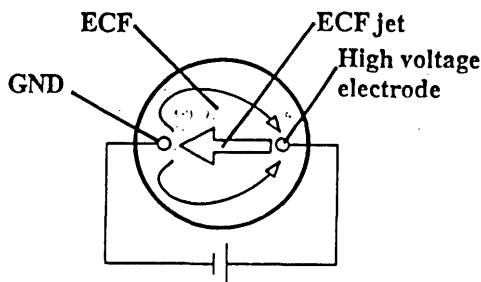


Fig. 1 Schematics of ECF effect

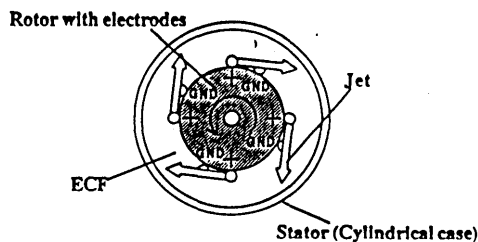


Fig. 2 Schematic diagram of a RE type ECF motor

ることから、SE 形 ECF モータに比べ、高出力、高効率が可能である。

2.2 内径  $\phi 4$  mm RE 形 ECF モータの試作 試作した内径  $\phi 4$  mm の RE 形 ECF モータの概略図を図 4 に示す。外径は直径  $\phi 5$  mm、長さ 15 mm である。電極対数は 4 対とし、電極配置は高電位電極と GND 電極がモータ中心と  $45^\circ$  をなすように配置されている。軸受にはボールベアリングを用い、摩擦トルクを低減している。外筒および上部、下部のふたやロータには加工が容易で高強度、電気絶縁性、耐薬品性に優れたエンジニアリングプラスチック ULTEM<sup>®</sup> (ポリエーテルイミド樹脂) を使用している。

RE 形 ECF モータの構造で最も考慮すべきところ

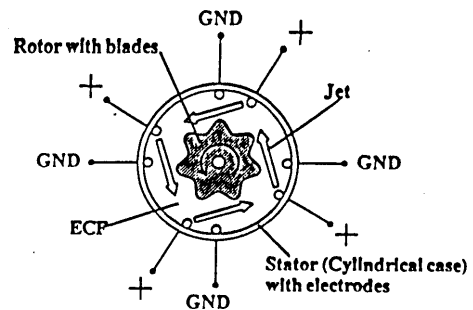


Fig. 3 Schematic diagram of a SE type ECF motor

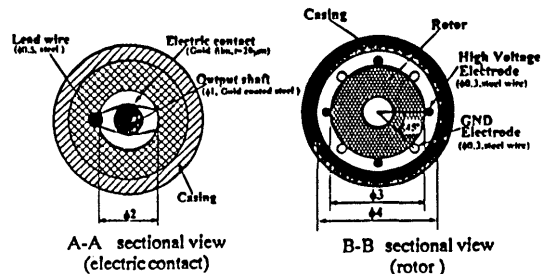
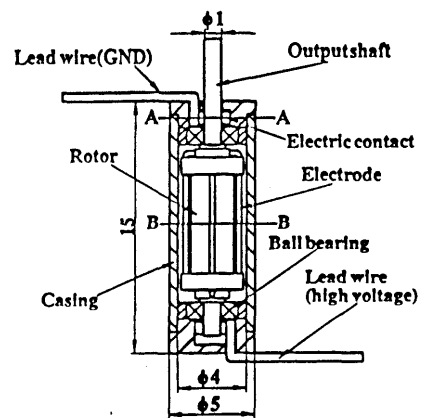


Fig. 4 Structure of RE type ECF motor (I. D.  $\phi 4$  mm)

は、ロータ電極への通電方法である。通電方法としては、

- ・回転軸と水銀による通電
- ・滑り軸受による通電
- ・回転軸と金属箔を加工した電気接点による通電

が考えられるが、安全性、摩擦の低減の観点から「回転軸と金属箔を加工した電気接点による通電」方法を採用する。具体的には金めっきを施した直径1mmの回転軸と厚さ0.02mmの金箔を加工した電気接点を用いている。金は延性が高く非常に薄く打ち延ばせるので、よりしなやかで接触摩擦の小さい電気接点の加工が可能である。さらに導電性、耐食性にも優れている。

### 3. RE形 ECF モータの特性

3・1 無負荷特性 ECF に DBD を使用し、試作した内径  $\phi 4$  mm RE 形 ECF モータの印加電圧・回転速度間静特性および印加電圧・電流間静特性を測定した。結果を図5に示す。詳細は後述するが、ECFには履歴による特性変化があることから、測定条件を同じくするため、以後の測定には、ECF 封入後、3 kV 電圧印加(5時間)、休止(20時間)、再度 3 kV 電圧印加(1時間)した ECF を用いている。

図5より6 kV 印加時に 200 rad/s(1900 rpm)が得られているのがわかる。また、回転速度が印加電圧にほぼ比例して増加しているのがわかる。この程度の回転数が得られれば、マイクロモータとして十分応用可能であると考えられる。さらに、回転速度が印加電圧に比例していることは、RE形 ECF モータのサーボモータとしての可能性を示している。印加電圧 1.5 kV から回転を始めているが、これは摩擦トルクの影響である。摩擦トルクは、ロータ電極への通電のための電気

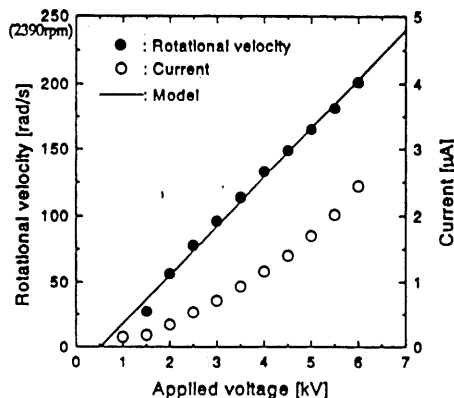


Fig. 5 Rotational velocity and current characteristics without load

接点がおもな原因と考えられる。ちなみに、6 kV 印加時の入力パワーは、15 mW である。また、放電対策を十分に行えば、さらに印加電圧を上げることは可能であり、さらに高速回転を実現できる。

3・2 負荷特性 出力軸に負荷を与え、そのときの出力トルクおよび消費電流を測定することで、試作した内径  $\phi 4$  mm RE 形 ECF モータの出力特性および効率を検討する。ただし、マイクロ ECF モータの出力トルクは  $\mu$  Nm オーダの微小トルクであり、直接測定することは極めて困難である。本論文では、小形軽量のプロペラの回転数と回転に要するトルクの関係を用いる方法により、RE 形 ECF モータの出力トルクを測定する<sup>(4)</sup>。

図6は、内径  $\phi 4$  mm RE 形 ECF モータの回転速度・出力トルク間静特性の測定結果を示す。全体に右下がりの傾向があることがわかる。トルク測定方法の原理上、回転速度が零のときの出力トルクは測定することができないが、測定した範囲内における最高トルク

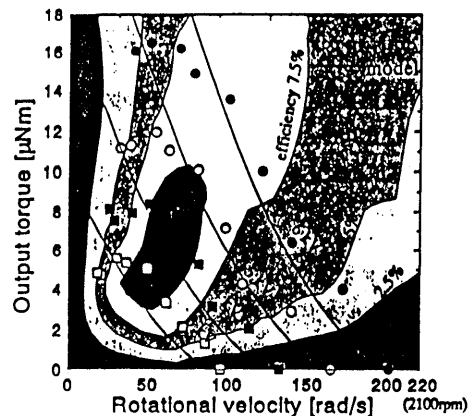


Fig. 6 Output torque characteristics (I. D.  $\phi 4$  mm)

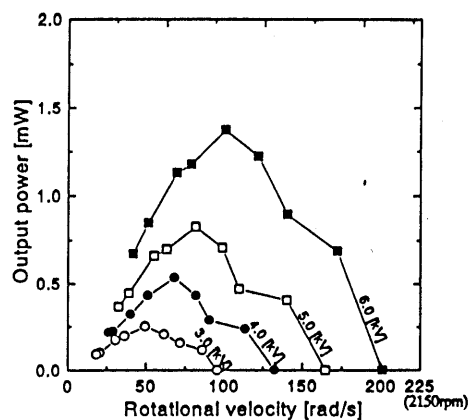


Fig. 7 Output power characteristics (I. D.  $\phi 4$  mm)

クとして  $16\mu\text{Nm}$  を得ている。また、図6には、消費電流の測定結果をもとに効率を算出し近似して求めた効率マップも示してある。ただし、測定範囲外は、外挿補完されたものであり、参考程度にみてもらいたい。効率として最高12%を得ている。ちなみに内径  $\phi 4\text{mm}$  SE形 ECFモータの最高効率は17%であり、RE形がSE形の効率を上回ることはできなかった。原因としては、ロータ電極電気接点の摩擦トルクおよび試作したRE形 ECFモータは、SE形にくらべ電極間距離が短いなどが考えられる。形状の最適化などによりさらに効率は向上できると考えられる。

図7には、図6の結果をもとに出力パワーを算出した結果を示す。図7より、最大出力パワーとして1.4mWを得られることがわかる。内径  $\phi 4\text{mm}$  SE形 ECFモータの最高出力が0.2mWであったことからRE形になったことで7倍の出力を実現したことになる。高出力が得られた要因としては、ECFジェットの反力により直接ロータを回転させているためと考える。

4. RE形 ECFモータ数学モデル

4.1 RE形 ECFモータ数学モデルの提案  
まず、RE形 ECFモータの運動方程式は、流体の粘度の影響を無視すると、

$$I\dot{\omega} = T_e - T_{out} - T_f \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで、 $I$ ：ロータ慣性モーメント、 $\omega$ ：角速度、 $T_e$ ：ECFジェットにより発生するトルク、 $T_{out}$ ：出力トルク、 $T_f$ ：摩擦トルクである。

式(1)中の ECFジェットにより発生するトルク  $T_e$  のモデル化において、

- ①ロータは、ジェット発生時の反力により回転し、ロータが受ける反力は、おもにジェット発生時に流体に与える運動量変化により発生すると考え、ジェットの平均流速の二乗に比例する。
- ② ECF効果により発生するジェットの平均流速 (ECF効果による流速の増速分) は電圧に比例し、ロータ回転速度に比例して減少する。
- ③ロータ上面および下面の影響は無視する、と仮定すると、ECFジェットにより発生するトルク  $T_e$  は、

$$T_e = nk_{re}prl(k_v V - r\omega)^2 \dots\dots\dots (2)$$

と表せる。ただし、  
 $n$ ：電極対数  
 $r$ ：ロータ半径  
 $l$ ：ロータ高さ  
 $V$ ：印加電圧

$k_{re}$ ：反力係数  
 $k_v$ ：電圧係数  
 $\rho$ ：流体密度

である。

また、式(1)中の摩擦トルク  $T_f$  は、回転速度によらず一定と仮定する。

以上より、無負荷時の回転数・印加電圧間静特性数学モデルは、

$$\omega = \frac{k_v}{r} V - \sqrt{\frac{T_f}{nk_{re}pr^3l}} \dots\dots\dots (3)$$

となる。また、出力トルク・回転数間静特性数学モデルは、

$$T_{out} = nk_{re}prl(k_v V - r\omega)^2 - T_f \dots\dots\dots (4)$$

となる。

4.2 実験結果との比較 提案する静特性数学モデル、式(3)および式(4)の妥当性を検証するため実

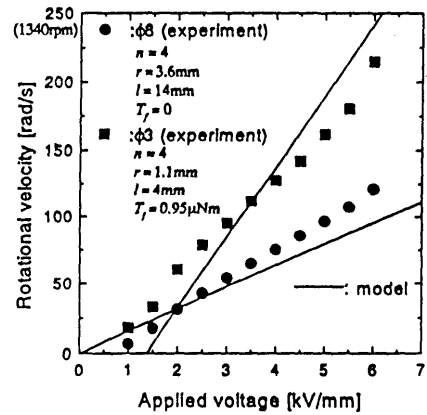


Fig. 8 Static characteristics between rotational velocity and applied voltage (I. D.  $\phi 8\text{mm}$ , I. D.  $\phi 3\text{mm}$ )

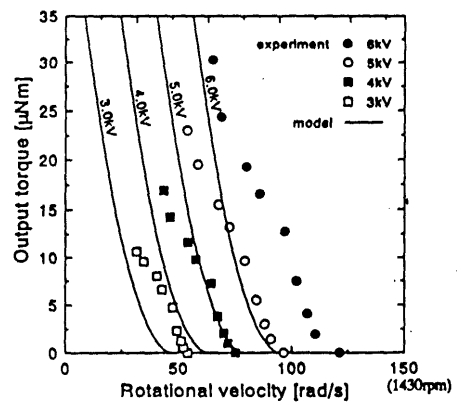


Fig. 9 Static characteristics between output torque and rotational velocity (I. D.  $\phi 8\text{mm}$ )

実験結果との比較を行った。結果を図5および6に示す。用いた各係数の値は次のとおりである。

$$k_{rv} = 9.3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$k_v = 5.7 \times 10^{-5} \text{ m/sV}$$

$$T_f = 3.1 \times 10^{-7} \text{ Nm}$$

各係数値は、実験結果と比較的一致する値を選んでいる。ただし、ロータ半径  $r$  およびロータ高さ  $l$  は試作した ECF マイクロモータの実測値を用いている。また流体密度  $\rho$  はメーカーのデータを使用している。具体的な値は次のとおりである。

$$n = 4$$

$$r = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$l = 6.0 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho = 0.94 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

比較のために図には、実験結果もプロットしてある。ただし、ここで提案している ECF モータの数学モデルには、後述する ECF の履歴による特性変化は考慮されていない。

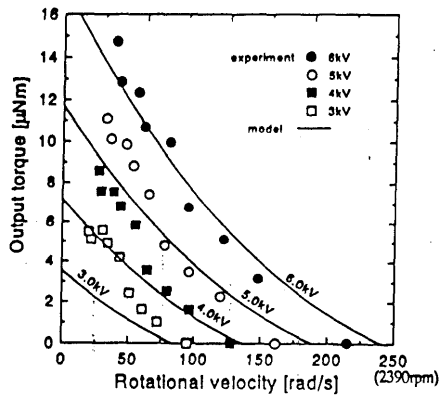


Fig. 10 Static characteristics between output torque and rotational velocity (I.D. φ3 mm)

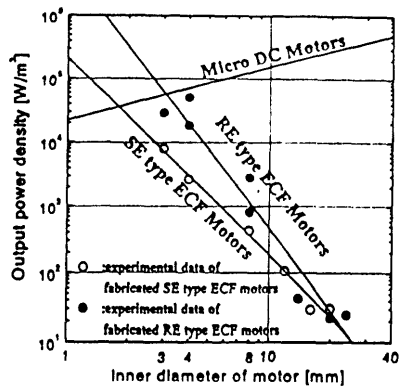


Fig. 11 Miniaturization characteristics of ECF motors for power density

### 5. RE形 ECF モータの微小化特性および SE形 ECF モータとの比較

#### 5.1 内径 φ8 mm, φ3 mm ECF モータ試作

RE形 ECF モータの微小化特性を検討するため、内径 φ8 mm および内径 φ3 mm の ECF モータを試作した。構造は基本的に内径 φ4 mm と同じである。図8, 9に、内径 φ8 mm RE形 ECF モータの無負荷時の回転速度・印加電圧間静特性および出力トルク・回転速度間静特性実験結果を示す。また図8, 10には、内径 φ3 mm RE形 ECF モータの実験結果を示す。また、それぞれの図には、式(3)および(4)の数学モデルシミュレーション結果も示してある。なお、シミュレーションにおいて、各係数値は、ロータ半径  $r$ 、ロータ長さ  $l$ 、摩擦トルク  $T_f$  以外はすべて内径 φ4 mm と同じ値を用いている。

各実験データとシミュレーション結果を比較すると、電圧係数  $k_v$ 、反力係数  $k_{rv}$  に内径 φ4 mm と同じ値を用いているにもかかわらず、比較的良好一致を示していると考えられる。この程度の一致が得られれば、設計時の ECF モータ出力特性見積りに有用である。

5.2 微小化特性 図6, 9, 10の実験結果をもとに、各 ECF モータの単位体積当たりの出力パワーを算出し、微小化特性をまとめた結果を図11に示す。論文中には示さないが、図11には内径 φ10 mm 以上の試作した ECF モータのデータもプロットしてある。図11より、本研究で提案する ECF モータは小形化するほど出力密度が向上することがわかり、マイクロモータに適した特性を有していることがわかる。この特性は SE形 ECF モータと同じ特性である。また、比較のために、電磁モータを小形化したときの出力パワー密度の見通しを示してある。これは、市販されている小形電磁モータの中で優れていると考えられるも

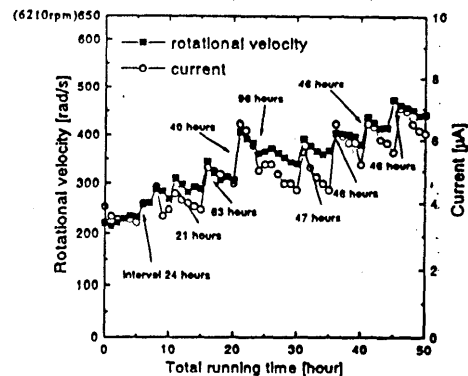


Fig. 12 Aging characteristics of ECF motors

のカタログデータ<sup>(7)</sup>を参考に求めたものである。参考にした小形電磁モータの仕様の一例を示すと、大きさ $\phi 4.8 \times 16$  mm, 最大出力 19 mW, 無負荷回転速度 1570 rad/s (15000 rpm), 効率 25%である。提案する RE 形 ECF モータは SE 形と同様にさらに小形化することにより、電磁マイクロモータより出力パワー密度の高いマイクロモータの実現が期待できる。

5.3 SE 形 ECF モータとの比較 図 11 中に示す SE 形と RE 形 ECF モータの微小化特性を比較すると、RE 形のほうが SE 形より小形化したときのパワー密度向上が大きいのことがわかる。ちなみに、直線近似したときの傾きでは、SE 形は、直径が 1/10 になるとパワー密度が  $10^3$  倍になるのに対し、RE 形は  $10^4$  倍になる。RE 形はロータへの通電のため電気接点が必要であるという、構造上の短所はあるが、パワー密度の点では ECF ジェット発生時の反力を利用することが、かなり有効に働いていることがわかる。

## 6. ECF モータ特性の経時変化

試作した内径  $\phi 4$  mm RE 形 ECF モータの経時変化を測定した。測定結果を図 12 に示す。測定方法は、5 時間の 3 kV 連続印加と休止を繰返し、無負荷回転速度および電流の変化を測定した。ただし、回転速度および電流の測定時は印加電圧 6 kV にして測定している。

図 12 より、連続 5 時間の通電を行うと回転速度および電流は徐々に低下するが、その後、休止を経て再び通電すると回転速度、電流ともに増加する傾向にあることがわかる。連続運転と休止を繰返すことにより ECF は履歴をもち、ECF モータの回転速度、電流が向上することがわかる。また、休止時間と回転速度、電流の増加に相関関係は見られない。図 12 の測定結果では電圧印加のべ 50 時間後に回転速度が開始直後より 2 倍程度向上することがわかる。

この現象のメカニズムは、明らかではないが、電流値と回転速度間に相関関係がみられることから、連続通電と休止により ECF の導電率などの物性値が変化しているのではないかと予想される。連続通電と休止による物性値の変化を含め、ECF モータ特性の経時変化のメカニズム解明は今後の課題としたい。また、経時変化の解明は、4 章の数学モデルをさらに厳密な数学モデルにすることにつながると思われる。

## 7. あとがき

本論文では、機能性流体の一つである ECF を用い

て、ロータ側壁面に電極を配置し、ECF ジェット発生時の反力によりロータを回転させる、新しい動作原理のマイクロモータ(RE 形マイクロ ECF モータ)を提案した。さらに、内径  $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm,  $\phi 8$  mm の RE 形マイクロ ECF モータを試作し実験的検討を行った。得られたおもな知見は以下のとおりである。

(1) 試作した RE 形 ECF モータの無負荷時の回転速度、出力パワー、効率を測定(内径  $\phi 4$  mm: 200 rad/s, max 1.4 mW, max 12%)し、提案する RE 形 ECF モータがマイクロモータとして応用可能な出力特性であることを明らかにした。

(2) RE 形 ECF モータの静特性数学モデルを提案し、実験結果との比較により、その妥当性を確認した。

(3) RE 形 ECF モータは、SE 形より微小化にもない出力パワー密度が大きくなる傾向にあり、マイクロモータに適した特性を有していることを示した。

(4) メカニズムは明らかではないが、ECF には履歴による特性変化があり、通電と休止の繰返しにより ECF モータの特性が向上する傾向にあることを示した。

今後の課題としては、まず、形状の最適化を図り設計法を確立すること、およびマイクロ加工技術を駆使し、さらなる ECF モータの微小化により出力パワー密度の増大を図ること、長期間の寿命測定を行い経時変化の傾向をさらに明らかにすること、および経時変化のメカニズム解明が挙げられる。

## 文 献

- (1) 大坪泰文・枝村一弥, 誘電液体モータの開発, 第 44 回レオロジー討論会講演要旨集, (1996), 210-213.
- (2) Otsubo, Y. and Edamura, K., Dielectric Fluid motors, *Apply. Phys. Lett.*, 71-3 (1997), 318-320.
- (3) 土田雄夫・沢田博康・上田寛, シリコン油中における各種不純物イオンの移動度, *電気学会論文誌*, 103-1, A (1983), 47-52.
- (4) Haga, M., ほか 7 名, Effect of Electric Field on Marangoni Convection under Microgravity, *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 12-1 (1995), 19-26.
- (5) Yabe, A. and Maki, H., Augmentation of convective and boiling heat transfer by applying an electrohydrodynamical liquid jet, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31-2 (1988), 407-417.
- (6) 横田真一・貞本敦史・近藤貴・大坪泰文・枝村一弥, 電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ(ステータ電極(SE)形マイクロ ECF モータの提案), *機論*, 66-642, C(2000), 627-633.
- (7) 並木精密宝石, 総合技術カタログ, 7-1(1998), 26-41.

### III-3 Micromotor Using Electroconjugate Fluid (Fabrication of Inner Diameter 2mm RE type ECF Motor)

Shinichi Yokota\*, Masakazu Hirata\*, Yutaka Kondoh\*, Koichi Suzumori\*\*,  
Atsushi Sadamoto\*\*\*, Yasufumi Otsubo\*\*\*\* and Kazuya Edamura\*\*\*\*\*

\* Tokyo Institute of Technology  
4259 Nagatsuta-cho Midori-ku Yokohama 226-8503  
E-mail: syokota@pi.titech.ac.jp

\*\*Okayama University  
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama-city, Okayama 700-8530, Japan

\*\*\*Toshiba Corp.

1 Komukai Toshiba cho Saiwai-ku Kawasaki 212-8582, Japan

\*\*\*\* Chiba University, 1-33 Yayoi-cho Inage-ku Chiba, 263-8522, Japan

\*\*\*\*\* New Technology Management, 2-9-1-306b Higashi -Shinkoiwa Katsushika-ku Tokyo 124-0023, Japan

[Received October 2, 2000; accepted November 7, 2000]

Some kinds of dielectric fluids as dibutyl decanedioate generate jet flow between electrodes. One of the authors calls the fluids ECF (Electro-conjugate Fluids), which are considered as smart fluids. The authors propose a micro motor by making use of ECF. In our previous paper, a rotor electrode (RE)-type micro ECF motor have been reported. In the paper, fabrication of micro ECF motors having I.D.  $\phi 3\text{mm}$ , I.D.  $\phi 4\text{mm}$ , I.D.  $\phi 8\text{mm}$  is described. On the RE-type micro ECF motor, some pairs of electrodes are located on the surface of a cylindrical rotor. The rotor can rotate with the reaction force caused by ECF jets. By making use of the ECF jet's reaction force, micro motors are easily realized. In this paper, fabrication of a micro ECF motor having I.D.  $\phi 2\text{mm}$  is described. Also, Basic characteristics such as rotational velocity are experimentally examined.

**Keywords:** Micro actuator, Dielectric fluid, Jet flow, Electrostatic, Micro motor, ECF, Smart fluid

## 1. Introduction

Development of actuators based on various actuation principles has been proposed in recent years for applying them to micromachines. Practical actuators applicable to the above-mentioned purpose, however, have not been developed yet, since actuators used for driving micromachines are required to be small in size and high in output power density.

We observed a phenomenon in which a jet flow is generated when high DC voltage is applied by a rod type electrode to non-conductive liquid having a specific chemical structure, such as dibutyl decanedioate (DBD).<sup>1)</sup> The mechanism of this phenomenon has not been clarified yet. As for phenomena that resemble this phenomenon, a number of reports have been issued in relation to such subjects as an EHD stream by ion drag,<sup>2)</sup> EHD convection,<sup>3)</sup> or EHD liquid jet.<sup>4)</sup> The flow velocity obtained according to this phenomenon is higher than those ob-

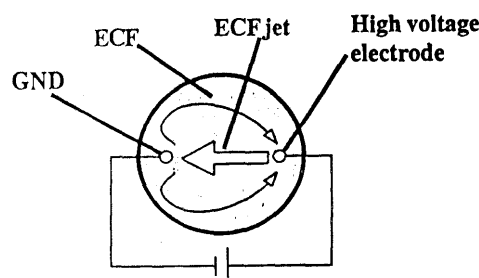


Fig. 1 Schematics of ECF effect

tained according to similar phenomena, so we have presumed that this phenomenon is based on a principle basically different from the principles related to the other phenomenon. It is considered in this paper that certain characteristics peculiar to the fluid are caused to appear by the effect of an electrostatic field. Accordingly, this fluid is called "electroconjugate fluid (ECF)", the practical application of which is to be examined here. With ECF (a functional fluid) applied to a motor, it is possible to realize a novel motor that is simple in structure, requires no switching circuit, and can be driven by DC voltage.

We previously proposed and produced "a stator-electrode (SE) type ECF" motor and "a rotor electrode (RE) type ECF motor" as micro ECF motors. Thus we have succeeded in fabricating a micromotor having an inner diameter of I.D.  $\phi 3\text{mm}$ .<sup>5,6)</sup>

To realize another type of micromotor that is smaller than the one described above, an I.D.  $\phi 2\text{mm}$  RE-type ECF motor is fabricated with a novel motor production method and an electrical contact to be devised. Furthermore, the characteristics of this motor are experimentally examined.

## 2. Electroconjugate Fluid (ECF)

### 2.1. Relationship with Fluid Physical Property

The electroconjugate fluid (ECF) is a functional fluid.

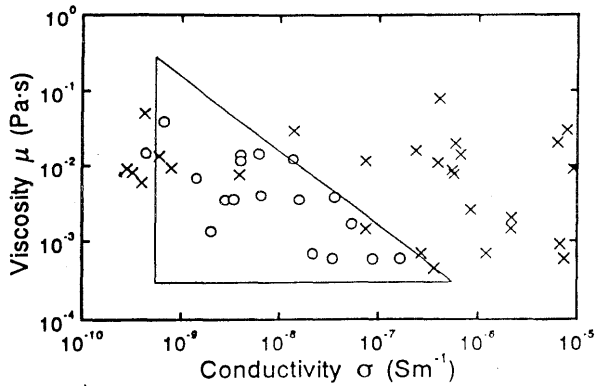


Fig.2 Distribution of ECF and Non-ECF

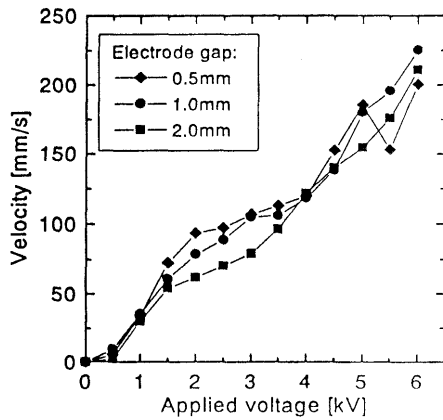


Fig.3 Characteristics of ECF jet velocity

As shown in Fig. 1, when high DC voltage is applied to a rod-type electrode inserted in ECF, jet flow is generated forcefully out of the high voltage electrode (EFF effect). Although the mechanism of the ECF effect has not been clarified yet, the fluid that generates the ECF effect is put in order for Fig. 2 according to its viscosity and conductivity. In Fig. 2, the fluid that generates the ECF effect is marked with a circle; the fluid that does not, with a cross. It can be seen from Fig. 2 that the ECF effect-generating fluid, showing a very interesting tendency, is closely related to viscosity and conductivity.

2.2 ECF Effect

Figure. 3 shows the relationship between changes in the voltage applied to the rod-type electrode and the flow velocity. The ECF used here is DBD. The distance between the high-voltage electrode and the GND electrode varies from 2mm to 1mm and 0.5mm, and the point of measurement is set on the line connecting these electrodes. When the distance between the electrodes is 2mm or 1mm, the point of measurement is set to the position 0.5mm away from the high-voltage electrode; when the distance between the electrodes is 0.5mm, the point of measurement is set to the position 0.25mm away from the high-voltage electrode. Figure 3 shows that the flow velocity is nearly proportional to the applied voltage, irrespective of the distance between the electrodes. Figure

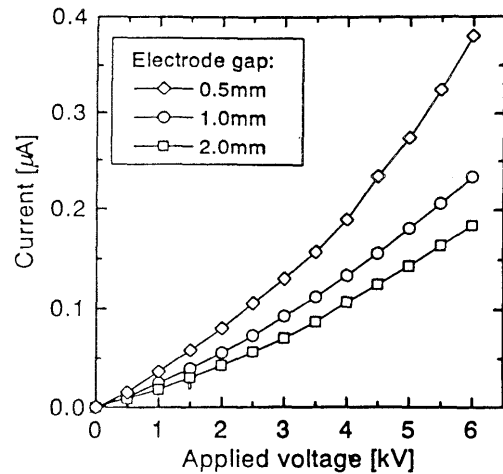


Fig.4 Current characteristics

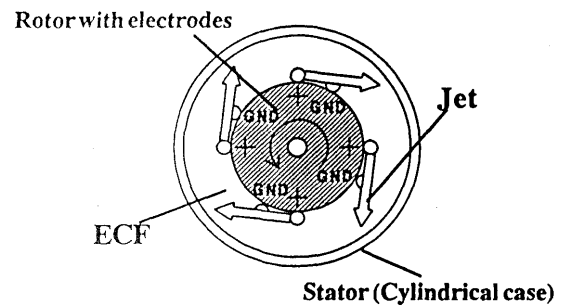


Fig.5 Schematic diagram of an ECF-RE type Motor

4 shows the relation between applied voltage and electric current, measured simultaneously with the measurement shown in Fig. 3. It can be seen from Fig. 4 that the smaller the distance between the electrodes, the larger the consumed electric current. The results indicated in Figs. 3 and 4 show that there is no correlation between the consumed current and the flow velocity, and that the presence of an electron moving path can be considered in addition to the movement of electrons due to the effect of jets.

3. Actuation Principle of Rotor Electrode (RE) type ECF Motor

Figure 5 shows the actuation principle of the rotor electrode (RE) type ECF motor proposed by our study. A rotor with pairs of rod-type electrodes located on the surface is inserted in a cylindrical vessel. When high voltage is applied to electrodes, jets flow is generated out of the electrodes due to the ECF effect. The reaction generated as a result causes the rotor to rotate. For comparison, the actuation principle of the SE type ECF motor we have previously proposed is shown in Fig. 6. In the case of the SE type ECF motor, Pairs of high voltage and GND rod-type electrodes are located on the inner surface

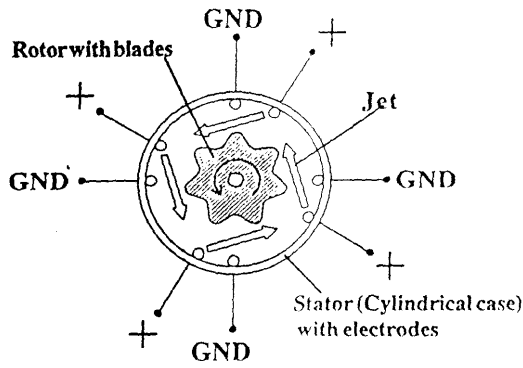


Fig.6 Schematic diagram of an ECF-SE type motor

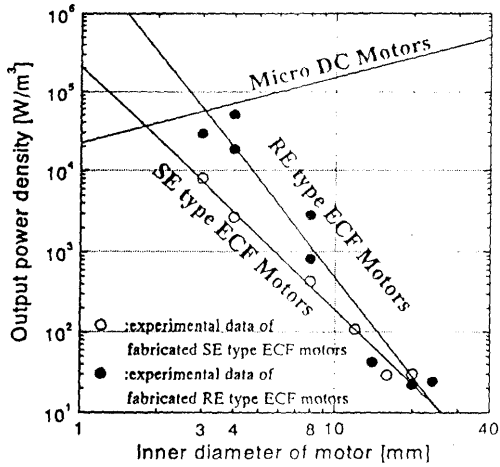


Fig.7 Miniturization characteristics of ECF motors for power density

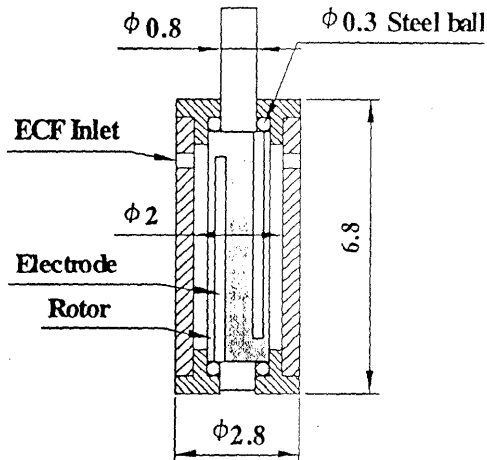


Fig.8 Schematics of 2mm RE type ECF motor

of a cylindrical vessel. When high voltage is applied to the electrodes, a circular flow is produced in the vessel due to the effect of ECF. When a rotor having vanes is put in the vessel, the force generated by the ECF flow can be taken out as torque.

Compared with the SE type ECF motor, in which the rotor is rotated by the circular flow based on the effect

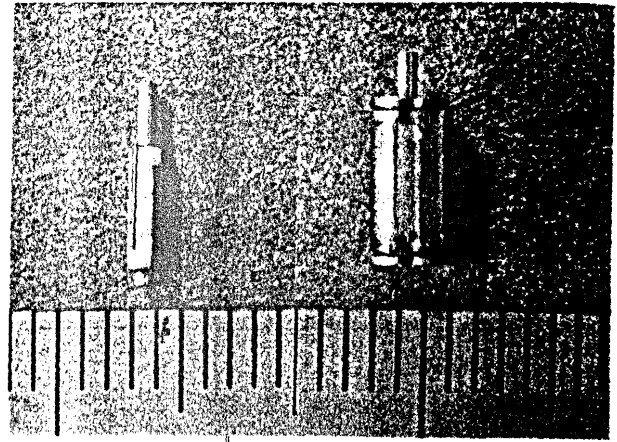


Fig.9 Photocopy of ECF motor (left) and rotor (right)

of ECF, the RE type ECF motor rotates its rotor directly by the ECF effect. Consequently, it can be expected for the latter motor to achieve higher output power and higher efficiency than the former one.

Figure 7 shows the output power calculated per unit volume and the miniaturization characteristics of each fabricated ECF motor. It can be seen from Fig. 7 that the more the ECF motor is miniaturized, the more the output power density is improved, and that the ECF motor is characteristically suitable when used as a micromotor. Shown in the same figure for comparison is the prospect of the output power density obtained with reference to the catalogues of commercially available micro electromagnetic motors<sup>2)</sup> of high quality on the assumption that the electromagnetic motors are miniaturized. As an example, the specifications of one of the micro electromagnetic motors are shown as follows:  $\phi 4.8 \times 16\text{mm}$ , maximum output of 19mW, no load rotational velocity of 1570rad/s(15000rpm), and efficiency of 25%. By miniaturizing the inner diameter of the ECF motors to less than  $\phi 3\text{mm}$ , it can be expected to realize a micromotor whose output power density is higher than that of the electromagnetic micromotors.

#### 4. Fabrication of RE-type ECF Motor of $\phi 2\text{mm}$ in Inner Diameter

Figure 8 shows the structure of an fabricated I.D. $\phi 2\text{mm}$  RE type ECF motor fabricated. Fig.9 shows the rotor and the micromotor, the rotor being made of machineable ceramic. Commercially available bearings are too large in size to be applied to this rotor, so eleven  $\phi 0.3\text{mm}$  steel balls are located as bearings to each of the upper and lower sides on the shoulder of the rotor. The RE type ECF motors have electrodes on their rotor side, and this involves a problem to be solved in relation to electrical contact with the rotor. In the case of the micromotor, however, voltage is applied from the brass cap on the upper and lower sides of the motor housing to the rotor by means of the  $\phi 3\text{mm}$  steel balls (which have replaced commercially available bearings as mentioned

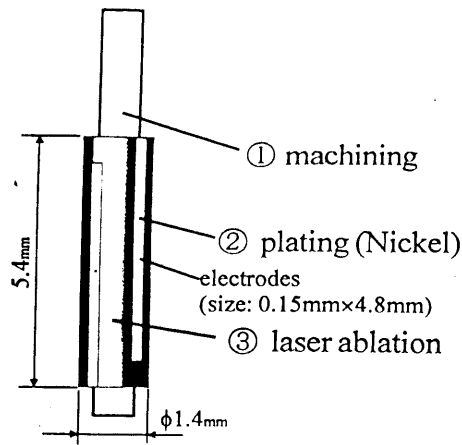


Fig.10 Fabrication process of the rotor and electrodes

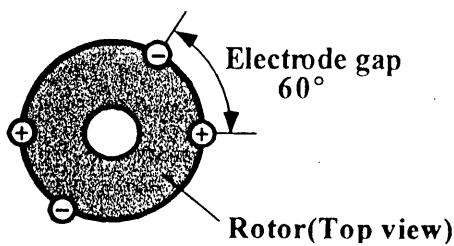


Fig.11 Arrangements of electrodes

above) used as a electrical contact. The electrical contact based on this method, therefore, is lower in friction and more stable than the method with the use of brushes. The cylindrical rotor housing is made from engineering plastic (polyether-imide polymer), and ECF is put into the housing through an opening in the housing. Little ECF leaks out from the motor owing to the effect of surface tension.

Figure 10 shows the fabrication process of the rotor. The rotor is machined, plated with nickel, and ablated by an EHG-YAG laser machining system to impose patterning work on the electrodes. Figure 11 shows the arrangements of electrodes for the rotor, in which the electrode gap is 60°. Each electrode is 0.15mm wide and 4.8mm long.

### 5. No Load Characteristics

Figure 12 shows the no load characteristics of the fabricated ECF motor (2 pairs of electrodes, electrode gap of 60°). ECF used here is DBD. When the applied voltage is 3.5kV, the maximum rotational velocity is 120rad/s(1200rpm) and the consumed current is 0.46μA. 1.7mW is estimated in consumed electrical power. The rotor starts with the applied voltage of 1.6kV. Below this, it does not rotate probably because of the effect of friction around the bearings. Above 3.8kV, a discharge phenom-

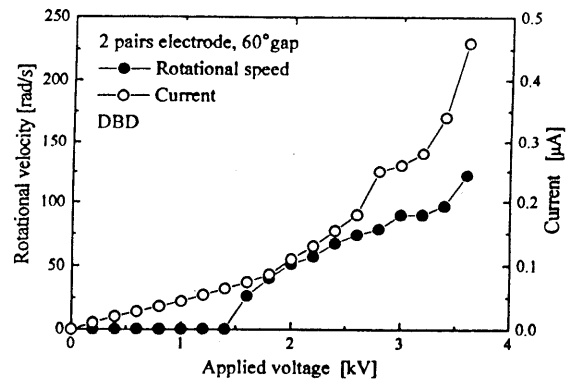


Fig.12 Characteristics of φ2mm RE type ECF motor (with DBD)

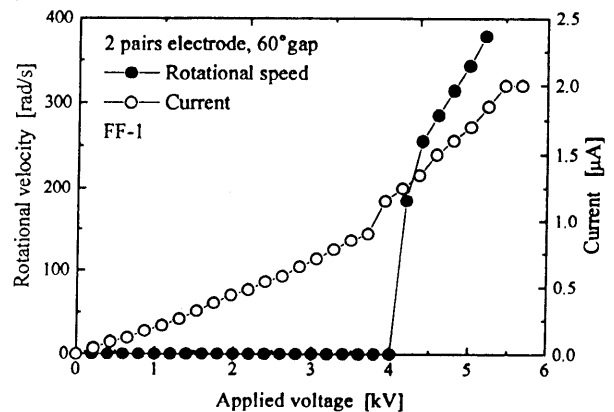


Fig.13 Characteristics of φ2mm RE type ECF motor (with FF-1)

non occurs, and it becomes impossible to apply voltage to the electrode gap. The introduction of a suitable measure against the discharge phenomenon will make it possible to realize a rotational motion with higher velocity.

Figure 13 shows the no load characteristics FF-1 (Fluoride Fluid 1) as ECF. The rotor starts with the applied voltage of 4.1kV. When the applied voltage is 5.2kV, the maximum rotational velocity is 380rad/s (3600rpm) and the consumed current is 2μA. 10mW is estimated in consumed electrical power. The use of FF-1 instead of ECF makes it possible to realize a higher rotational velocity as compared with DBD. On the other hand, it can be seen from the same figure that the rotate-starting voltage is higher and the consumed current (consumed electrical power) is larger. This is probably because of the lubrication property and conductivity of FF-1.

As described in Chapter 2, the existence of a number of fluids that function as ECFs has so far been shown definitely. As the characteristics of each motor vary with the type of ECF, it is necessary from now on to select a ECF suitable for a micro ECF motor by investigating the characteristics of ECF.

## 6. Conclusions

We have fabricated an I.D.  $\phi$ 2mm RE-type ECF motor. In the process of miniaturization, there are problems to be solved in relation to the fabrication of rotor electrodes and to the electrical contact to the rotor. These problems have been solved by fabricating electrodes through laser application and by using I.D.  $\phi$ 0.3mm steel balls as bearings and as an electrical contact.

The no load characteristics of the fabricated I.D. 2mm ECF motor have been experimentally examined. As a result, the maximum rotational velocity of 380rad/s (3600rpm) has been obtained. It can be expected to achieve a higher rotational velocity by taking a suitable measure against electrical discharge. The major subjects to deal with in the future are to devise a method for measuring microscopic torque blow  $\mu$ Nm and to investigate the output power characteristics of the fabricated I.D.  $\phi$ 2mm RE-type ECF motor.

### Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the support of Mr. Nakayama, graduate school student in Tokyo Institute of Technology. This research has been partly supported by grants of Grant-in-Aid for Scientific Research of the Ministry of Education, Science and Culture of Japan. (No.12875031)

### References:

- 1) Otsubo, Y. and Edamura, K., Dielectric Fluid motors, *Apply, Phys. Lett.* 71-3(1997), 318-320.
- 2) Tsuchida, N., Sawada, H. and Ueda, M. The Mobilities of Various Impurity Ions in Silicone Oil, *The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, A*, 103-1(1983), 47-52 (In Japanese).
- 3) Haga, M. et al., Effect of Electric Field on Marangoni Convection under Microgravity, *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 12-1(1995), 19-26, (1995).
- 4) Yabe, A. and Maki, H., Augmentation of convective and boiling heat transfer by applying an electro-hydrodynamical liquid jet, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31-2(1988), 407-417.
- 5) Yokota, S. et al., A Micro Motor Using Electro-Conjugate Fluids(ECFs)[Proposition of Stator Electrode(SE)-Type Micro ECF Motors], *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 66-642, C(2000), 627-633 (In Japanese).
- 6) Yokota, S. et al., A Micro Motor Using Electro-Conjugate Fluids(ECFs)[Proposition of Rotor Electrode(RE)-Type Micro ECF Motors], *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, In press (In Japanese).
- 7) NAMIKI PRECISION JEWEL CO., LTD, Mamiki Motor Catalogue (In Japanese).



**Name:**  
Shinichi Yokota

**Affiliation:**  
Professor, Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

**Address:**  
4259 Nagatsuda, Midori-ku, Yokohama 226-8503, Japan

### Brief Biographical History:

1975-Research Associate of Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology  
1986-Associate Professor of Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology  
1995- Professor of Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

### Main Works:

- Electro-Hydraulic Control,
- Fluid Power Micro Mechanism,
- Micro Control Valve using Functional Fluids

### Membership in Learned Societies:

- The Japan Society of Mechanical Engineers
- The Japan Hydraulics and Pneumatics Society
- The Robotics Society of Japan
- The Society of Instrument and Control Engineers, Japan



**Name:**  
Masakazu Hirata

**Affiliation:**  
Graduate School Student

**Address:**  
4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8503

### Brief Biographical History:

1999-Department of Precision Machinery Systems, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

### Main Works:

- ECF micro motor

### Membership in Learned Societies:

- The Japan Society of Mechanical Engineers
- The Japan Hydraulics and Pneumatics Society



**Name:**  
Yutaka Kondoh

**Affiliation:**  
Research Associate, Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

**Address:**  
4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8503, Japan

**Brief Biographical History:**  
1996-Research Associate at P&I Lab. Tokyo Institute of Technology

**Main Works:**

- Fluid Power System, Actuator, Micro Actuator, Application of Functional Fluids

**Membership in Learned Societies:**

- The Japan Society of Mechanical Engineering's
- The Japan Hydraulics and Pneumatics Society



**Name:**  
Yasufumi Otsubo

**Affiliation:**  
Professor of Department of Urban Environment Systems at Chiba University

**Address:**  
Yayoi-cho 1-33, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

**Brief Biographical History:**  
1978-Assistant Professor at Tohoku University  
1982-Assistant Professor at Chiba University  
1987-Visiting Research Associate at Princeton University  
2000-Full Professor at Chiba University

**Main Works:**

- Rheology Control of Suspensions
- Electrorheology and Electrohydrodynamics
- Application of Colloids to Imaging Devices

**Membership in Learned Societies:**

- The Society of Rheology
- The Society of Chemical Engineers, Japan
- The Chemical Society of Japan



**Name:**  
Atsushi Sadamoto

**Affiliation:**  
Mechanical System Laboratory, Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation

**Address:**  
1, Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki, 212-8582, Japan

**Brief Biographical History:**  
1997-Mechanical Systems Laboratory, Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation

**Main Works:**

- Micromachine, Microactuators

**Membership in Learned Societies:**

- The Japan Society of Mechanical Engineers



**Name:**  
Kazuya Edamura

**Affiliation:**  
CEO, New Technology Management Co., Ltd.

**Address:**  
2-9-1-306, Higashi-Shinkoiwa, Katsushika-ku, Tokyo 124-0023, Japan

**Brief Biographical History:**  
1976-Graduate School of Tokyo Institute of Technology  
1978-Chemist in Research La. Kyowa Hakko Kogyo Co., Ltd., etc.  
1985-Product Manager in Diagnostics Dept. Boehringer Mannheim Japan, etc.  
1995-CEO, New Technology Management Co., Ltd.

**Main Works:**

- Formulation of intelligent fluids, ECF (Electro-Conjugate Fluid) technology
- MR fluid technology
- Organic/inorganic composite particle ERF, partly author (supervision of K. Koyama)
- Development of Electro Rheological Fluid, CMC (1999)

**Membership in Learned Societies:**

- The Japan Society for Precision Engineering
- The Society of Grinding Engineers
- The Society of Rheology, Japan



**Name:**  
Koichi Suzumori

**Affiliation:**  
Research Scientist  
Toshiba Corporation

**Address:**  
Komukai-Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 212-8582, Japan

**Brief Biographical History:**  
1984-Joined Toshiba Corporation  
1990-Received the Ph.D. degree in mechanical engineering from Yokohama National University

**Main Works:**

- Actuator, Microrobot

**Brief Biographical History:**

**Membership in Learned Societies:**

- The Japan Society of Mechanical Engineers
- The Robotics Society of Japan
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers

### III-4 A Micro Motor Using Electroconjugate Fluids (ECFs) \* (Proposition of Stator Electrode Type (SE-type) Micro ECF Motors)

Shinichi YOKOTA\*\*, Atsushi SADAMOTO\*\*\*,  
Yutaka KONDOH\*\*, Yasufumi OTSUBO\*\*\*\*  
and Kazuya EDAMURA\*\*\*\*\*

Some dielectric fluids such as dibutyl decanedioate generate jet flow between a pair of electrodes. One of authors discovered electroconjugate fluid (ECF hereafter), which is considered to be a kind of functional fluid. In this study, a micro motor that utilizes ECF is proposed. In the proposed motor, are pairs of electrodes located inside a cylindrical tube (stator) filled with ECF. In the stator, rotational flow is induced by ECF jets. By extracting the rotational flow power with a rotor, micro motors are easily realized. In this paper, the fabrication of micro ECF motors having an I.D. of  $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm or  $\phi 8$  mm is described. Basic characteristics such as rotational velocity, load characteristics, output power and efficiency are experimentally examined. Also, mathematical models of the ECF motors are proposed and verified with experimental data. Finally, miniaturization characteristics are examined using the fabricated ECF motors.

**Key Words:** Actuator, Micro Machine, Jet, Dielectric Fluid, Jet Flow, Electrostatic, Micro Motor, Power Density, ECF, Smart Fluid, Functional Fluid, New Actuator

#### 1. Introduction

To drive practical micromachines, actuators are desired as they generate sufficient power even with the decrease in dimensions. However, to the best of our knowledge, no such actuators have been developed thus far. Under such circumstances, we propose a micro motor driven by a new principle. In this study, a motor using a kind of dielectric fluid jet flow is

proposed and investigated experimentally.

Dielectric fluids such as dibutyl decanedioate (DBD) generate jet flow between electrodes. One of us discovered electroconjugate fluid (ECF hereafter), which is considered to be a kind of functional fluid.

Similar phenomenon has been reported, such as an EHD (Electro Hydro Dynamic) stream by ion drag, an EHD convection and an EHD liquid jet<sup>(1)-(3)</sup>. However, the calculated flow velocity by ion drag based on ionic mobility is far lower than our results. Also, the reported flow velocity of EHD convection<sup>(2)</sup> is very low. The reported EHD liquid jet<sup>(3)</sup> has flow velocity lower than our results. It is now considered that the phenomenon found by one of us is not the same as that of the EHD stream.

In this study, since we consider that the potential property of the fluid is appeared by the applied electrostatic field, the fluid is called electroconjugate fluid (ECF). It is may be valid to apply ECF to micro motors with a simple structure and a simple DC power supply.

Using the phenomenon, there is potential to

\* Received 13th November, 2000. Japanese Original: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Vol. 66., No. 642, C (2000), pp. 627-633 (Received 4th June, 1999)

\*\* Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8503, Japan. E-mail: syokota@pi.titech.ac.jp

\*\*\* Graduate School, Tokyo Institute of Technology, Japan

\*\*\*\* Engineering Faculty, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

\*\*\*\*\* New Technology Management Co., Ltd., 2-9-1-306 Higashishinkoiwa, Katsushika-ku, Tokyo 124-0023, Japan

create micro motors based on a new principle. In this study, we proposed stator electrode type (SE-type) ECF motors, in which the rotor shaft with vanes is rotated by a propulsion force due to jet flow injected from stator electrodes.

Basic characteristics such as rotational velocity, load characteristics, output power and efficiency are experimentally examined. Also, mathematical models of the ECF motors are proposed and verified with experimental data. Finally, miniaturization characteristics are examined using the fabricated ECF motors.

## 2. Property of ECF

### 2.1 Electroconjugate fluid (ECF)

As shown in Fig. 1, when a cylinder is filled with a kind of dielectric fluid (called ECF in this paper) such as DBD (concentration: 100%), and high DC voltage is applied between a pair of rod-type electrodes located around the cylinder, jet flows as shown by arrows are produced between the electrodes (ECF effect). Although the mechanism yet remains to be clarified, the following characteristics were elucidated by us. Figure 2 indicates the relationship between viscosity and conductivity of different dielectric fluids whose molecular structures are similar to DBD. In Fig. 2, fluids that exhibit the ECF effect are represented by circles, and those that do not exhibit this effect are represented by crosses. It is obvious that in the

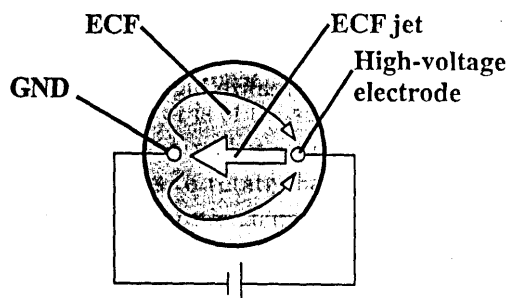


Fig. 1 Schematic of ECF effect

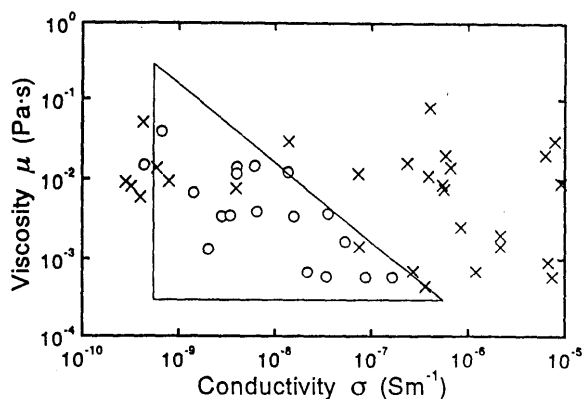


Fig. 2 Distribution of ECF and non-ECF

fluids that exhibit the ECF effect, there is good correlation between viscosity and conductivity.

### 2.2 Current and velocity of ECF jet

When high voltage is applied to ECF with a pair of rod-type electrodes, jet flow is injected from the positive electrode to the negative electrode. The velocity of the ECF jet injected from the positive electrode is measured with a laser Doppler velocimeter, and the results are shown in Figs. 3 and 4. Figure 4 shows that the current change is a second-order function of the applied voltage, and Fig. 3 shows that the velocity is independent of the gap size of electrodes. This means that ECF jet velocity is determined by the applied voltage only and is proportional to it.

Figures 3 and 4 show weak correlation between current and velocity. The mechanism of ECF flow is yet to be clarified; however, it can be inferred there may be some moving path of ECF electrons other than jet flows.

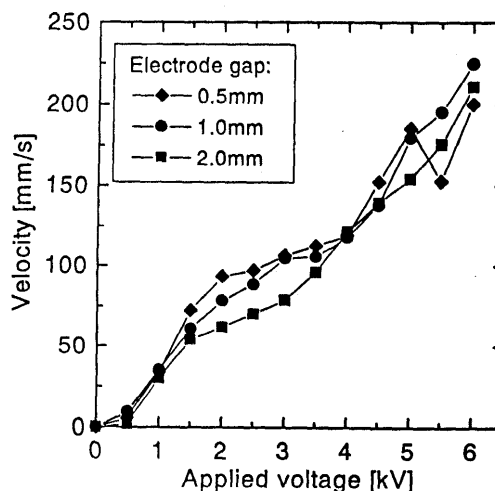


Fig. 3 Characteristics of ECF jet velocity

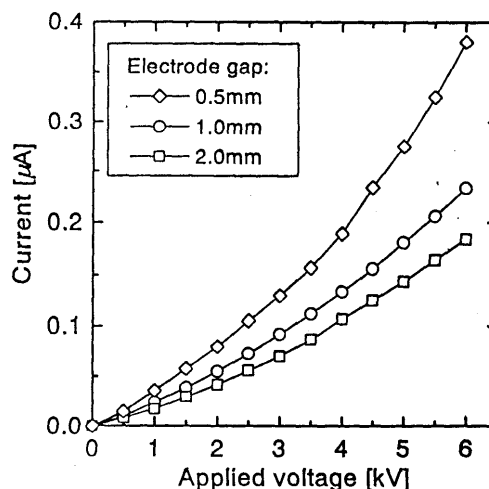


Fig. 4 Current characteristics

### 3. The Proposed Micro Motor

#### 3.1 Principle of proposed ECF motor

The principle of the proposed micro motor is shown in Fig. 5. The motor consists of a rotor with vanes and a stator with several pairs of electrodes. The output shaft is rotated by a propulsion force due to jet flows injected from the electrodes. In this paper, this type of motor is called the "SE (stator-electrode)-type motor". Hereafter, DBD is used as the working fluid.

#### 3.2 Fabrication of ECF motor

Figure 6 shows the fabricated SE-type ECF motor of which inner diameter is 4 mm (abbreviated to ID  $\phi 4$  motor, hereafter). The height of the outer cylinder is 9 mm and its diameter is 6 mm. The motor consists of a cylinder filled with DBD, two pairs of electrodes that produce a jet, a rotor with an output shaft and vanes rotated by the jet.

Each pair of electrodes is set at 90 degrees. Ball bearings are used as the upper and lower bearings. The stator cylinder and the rotor are made of an engineering plastic (ULTEM<sup>®</sup>), and the electrodes are

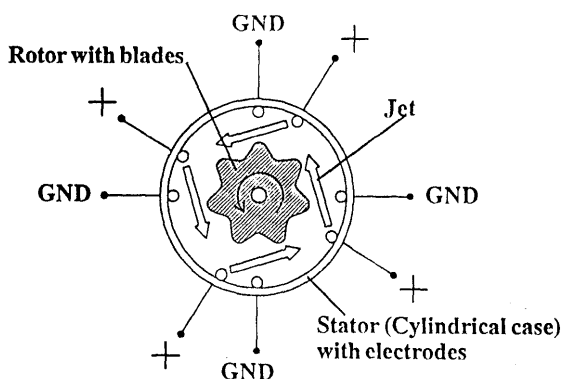


Fig. 5 Schematic diagram of an ECF-SE motor

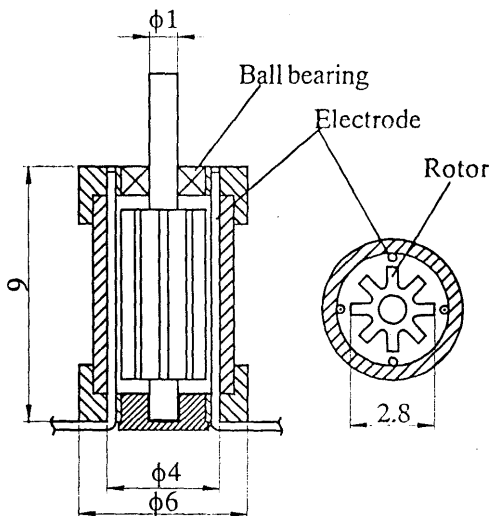


Fig. 6 Structure of SE type ECF motor (I.D.  $\phi 4$  mm)

made of steel rod of  $\phi 0.3$  mm. The rotor is cut out from the plastic rod by means of watch machining technology. The number of vanes on the rotor is eight. The parts are manufactured by machining and fixed with an adhesive.

### 4. Experiments on Characteristics of Fabricated ECF Motor

#### 4.1 No-load characteristics

In order to investigate the basic characteristics of the fabricated ECF motors, the rotational velocity and current are measured at various applied voltages with no-load applied to the output shaft. The rotational velocity is obtained from output signal of a photo interruptor that detects the rotation of a slit disk attached to the output shaft. Current is obtained from the measured voltage in series resistance connected to an ECF motor. The applied voltage is obtained using a voltage divider.

Figure 7 shows the results of an ID  $\phi 4$  motor. The current change is a second-order function of the applied voltage. The rotational velocity changes linearly. The rotor starts to rotate at applied voltage of 1 kV due to the inner friction of the motor. The maximum rotational velocity is 210 rad/s (2 000 rpm), when 6 kV is applied. This velocity is considered to be sufficient for the motor to be applicable as a micro motor. Also, the proportional characteristic of the velocity-voltage curve indicates that the motor can be used as a servo motor. Here, input power when 6 kV is applied is 3 mW. In addition, to take some measures against electric discharge, it is possible to apply higher voltage and to realize higher rotational velocity of the motor.

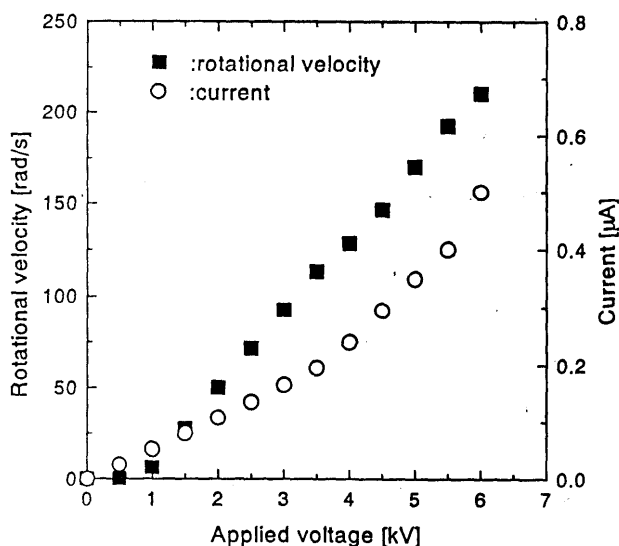


Fig. 7 Rotational velocity and current characteristics without load

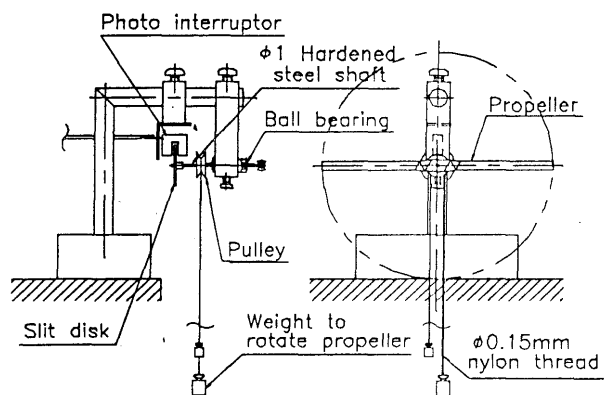


Fig. 8 Acquisition apparatus of propeller characteristics

## 4.2 Output characteristics

### 4.2.1 Estimation method of small output torque

Since the magnitude of the output torque of the fabricated ECF motor is estimated to  $\mu\text{Nm}$  order, there are no measurement devices that can measure such a small torque directly and simply. In this paper, a new indirect measurement method that uses calibrated propellers is introduced. In that method, the output torque is estimated by employing the relationship between rotational velocity and torque of lightweight small propellers.

Firstly, we prepared eight propellers with different dimensions so as to apply different loads to the ECF motor shaft.

Secondly, the prepared propellers are calibrated in terms of their torque-rotational velocity relationships with the apparatus shown in Fig. 8. The apparatus consists of a rotational shaft supported by two miniature bearings (it is of the same type as that used in the ECF motor), a pulley attached to the shaft, a thread with weights to rotate the pulley, and devices for measuring the rotational velocity of the shaft (a slit disk and a photo interruptor). The procedure for calibration is as follows: A propeller is attached to the shaft. A flexible thread with weights is hung on the pulley. A weight is attached to one end of the thread. Then, due to the difference in weight force, the propeller starts to rotate. The rotational velocity is accelerated by gravity, but when two torques applied to the shaft (a torque due to the drag of the propeller and a torque due to the additional weight) reach equilibrium, the rotational velocity becomes constant. The torque due to the additional weight is thought as the required torque for rotating the propeller at a constant velocity. Using various weights (in this case five kinds of weights), the relationship between the torque and the rotational velocity for one propeller is obtained.

Thirdly, the propeller is attached to the fabricat-

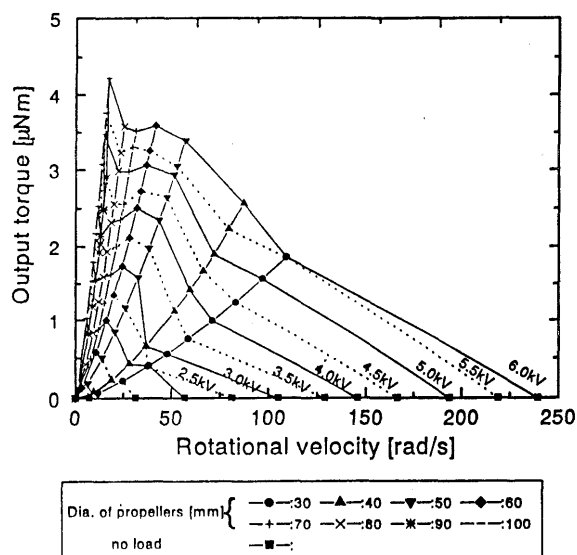


Fig. 9 Output torque characteristics (I.D.  $\phi 4$  mm)

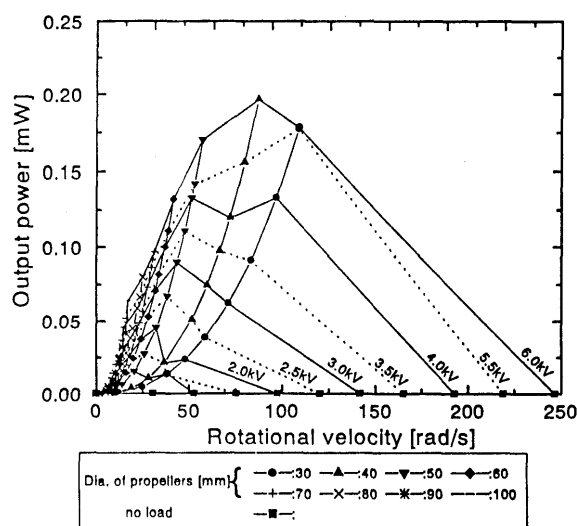


Fig. 10 Output power characteristics (I.D.  $\phi 4$  mm)

ed ECF motor, and the rotational velocity and current are measured at various applied voltages. When constant voltage is applied to the ECF motor, the operating point is determined using one propeller. Hence, using eight propellers, eight operating points are determined at a constant voltage.

### 4.2.2 Output characteristics of fabricated ECF motor

Figure 9 shows the rotational velocity vs. torque characteristics of ID  $\phi 4$  motor, and Fig. 10 denotes the rotational velocity vs. output power characteristics of ID  $\phi 4$  motor. The torque curve has a tendency to decrease with increment of the rotational velocity. This tendency is similar to that of a typical servo motor.

Figure 11 shows output power and efficiency characteristics. The maximum output power of ID  $\phi 4$  motor is 0.2 mW when 6 kV is applied. The

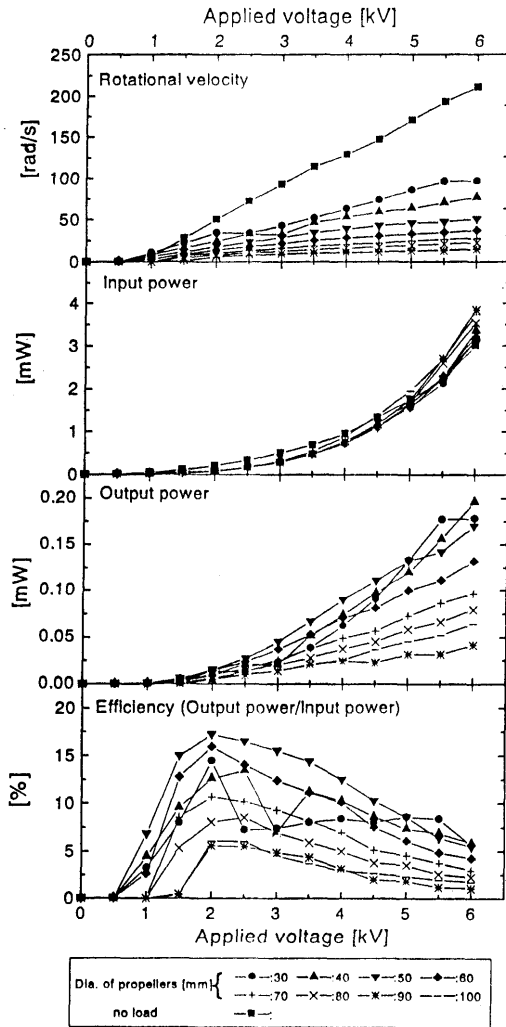


Fig. 11 ECF 4 mm motor power characteristics

maximum efficiency of ID  $\phi 4$  motor is 17% (@2 kV). At present, the design of the rotor vane is very simple; however, it is possible to improve the design, making it suitable to catch the drag force due to jets to improve its efficiency.

5. Mathematical Model of SE-type ECF Motors

5.1 Derivation of mathematical model of SE-type ECF motors

First, we ignore the influence of fluid viscosity. Then, the equation of motion of SE-type ECF motors is obtained as follows:

$$I\dot{\omega} = T_p - T_{out} - T_f \tag{1}$$

where  $I$  is moment of inertia of rotor,  $\omega$  is angular velocity,  $T_p$  is torque caused by ECF jets,  $T_{out}$  is output torque, and  $T_f$  is inner friction torque.

The following conditions are assumed for deriving the modelling of  $T_p$  in Eq.(1) :

- ① The average flow velocity of jets induced by the ECF effect is proportional to the applied voltage.
- ② We assume that the drag force exerted on the

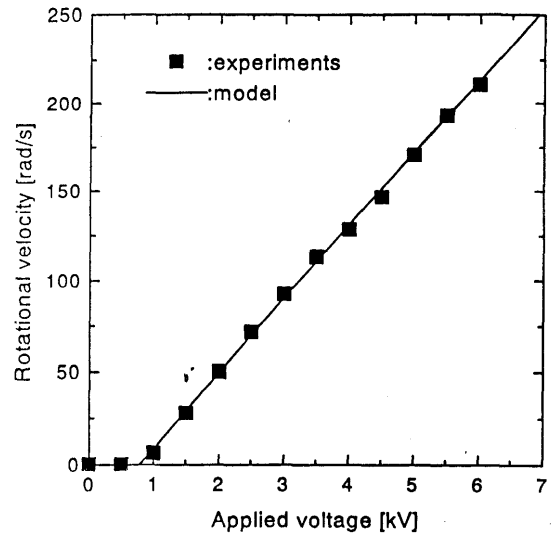


Fig. 12 Simulation results using the mathematical model

rotor due to the jets is mainly produced by the momentum change of the jets, and the force is proportional to the second order of the relative velocity between the jets and the side surface of the rotor.

- ③ We assume that the influence of the upper and lower ends of the rotor can be ignored.

The torque produced by ECF jets  $T_p$  can be described as follows:

$$T_p = k_{dr}\rho r l (k_v V - r\omega)^2 \tag{2}$$

where  $r$  is rotor radius,  $l$  is rotor height,  $V$  is applied voltage,  $k_{dr}$  is drag force coefficient,  $k_v$  is voltage coefficient, and  $\rho$  is density of fluid.

Also, it is assumed that the inner friction torque  $T_f$  in Eq.(1) remains constant and is independent of the rotational velocity.

From the above equations, a static mathematical model of the applied voltage and the rotational velocity under the no-load condition can be obtained as follows:

$$\omega = \frac{k_v}{r} V - \sqrt{\frac{T_f}{k_{dr}\rho r^3 l}} \tag{3}$$

Also, a static mathematical model of the output torque and the rotational velocity under the no-load condition can be obtained as follows:

$$T_{out} = k_{dr}\rho r l (k_v V - r\omega)^2 - T_f \tag{4}$$

5.2 Comparison with experimental results

To validate the proposed static mathematical model, i.e., Eqs.(3) and (4), the results from the model are compared with those from experiment. Figures 12 and 13 denote the results. The numerical values of coefficients used here are as follows:

$$\begin{aligned} k_{dr} &= 6.3 \times 10^{-3} \text{ m} \\ k_v &= 5.7 \times 10^{-5} \text{ m/sV} \\ T_f &= 8.4 \times 10^{-8} \text{ Nm} \end{aligned}$$

The values are chosen to show comparatively good

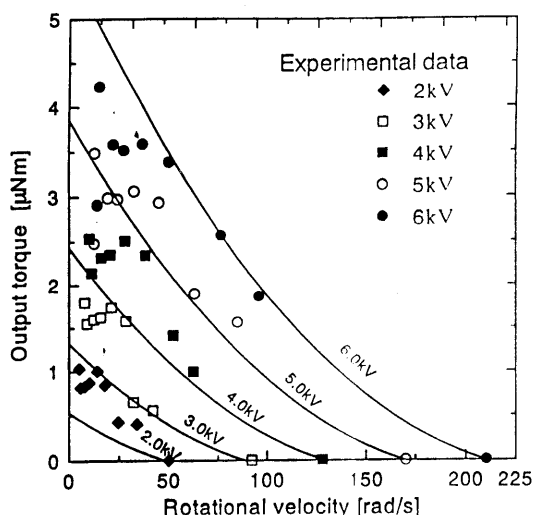


Fig. 13 Simulation results using the mathematical model for static characteristics between output torque

agreement with the experimental results except the values below.

$$r = 1.4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$l = 6.0 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho = 0.94 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

For convenience in comparison, the experimental results are plotted simultaneously. From Figs. 12 and 13, both theoretical and experimental results show good agreement. Thus it is confirmed that we can describe the static characteristics using the proposed model.

## 6. Miniaturization Characteristics of SE-type ECF Motors

### 6.1 Fabrication of ECF motors with ID $\phi 8$ and ID $\phi 3$

In order to investigate the miniaturization characteristics of ECF motors, SE-type ECF motors with ID  $\phi 8$  and ID  $\phi 3$  are fabricated. The structures of these motors are basically similar to that of the ID  $\phi 4$  motor. Figures 14 and 15 denote rotational velocity vs. applied voltage characteristics with no-load condition and rotational velocity vs. output torque characteristics of the ID  $\phi 8$  motor, respectively. Figures 16 and 17 denote those of the ID  $\phi 3$  motor. For comparison, simulation results using models [Eqs. (3) and (4)] are plotted simultaneously. Here, the numerical values of the dimensions except for rotor radius, rotor height and friction torque used in the simulation are the same as those in the case of the ID  $\phi 4$  ECF motor.

### 6.2 Miniaturization characteristics

To ascertain the potential of using the SE-type motor as a micro motor, the output power density is calculated based on the results in the previous section.

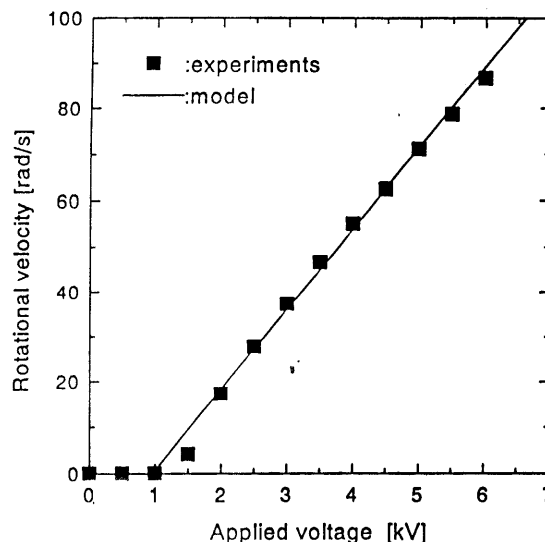


Fig. 14 Static characteristics between rotational velocity and applied voltage (I.D.  $\phi 8$  mm)

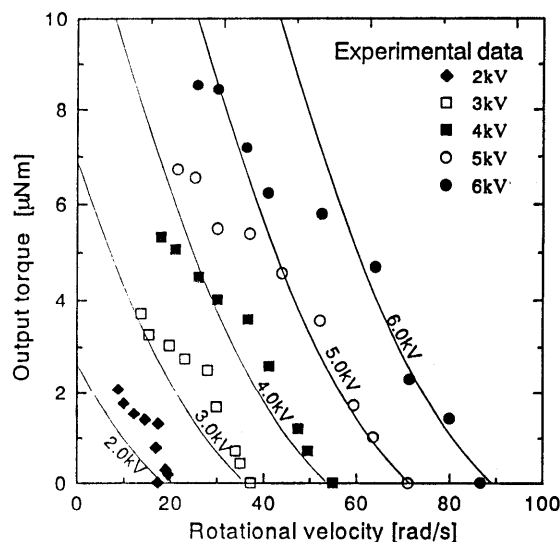


Fig. 15 Static characteristics between output torque and rotational velocity (I.D.  $\phi 8$  mm)

Figure 18 shows the relationship between output power density and inner diameter of motor. In the calculation, the volume of the motor is obtained as the product of rotor length and inner cylinder cross-sectional area. The inner diameters of 12 mm, 16 mm and 20 mm, are obtained from our previous experiments<sup>(4),(6)</sup>. In Fig. 18, the estimated miniaturization characteristics of an electromagnetic motor are also plotted.

The output power density of the electromagnetic actuator decreases with miniaturization. Hence, it does not seem to be suitable for use as a micro-actuator. On the other hand, it is clarified that the output power density of the ECF motor increases markedly with miniaturization; thus the ECF motor

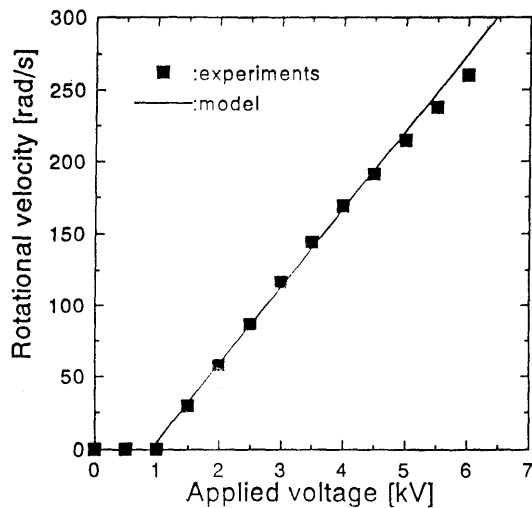


Fig. 16 Static characteristics between rotational velocity and applied voltage (I.D.  $\phi 3$  mm)

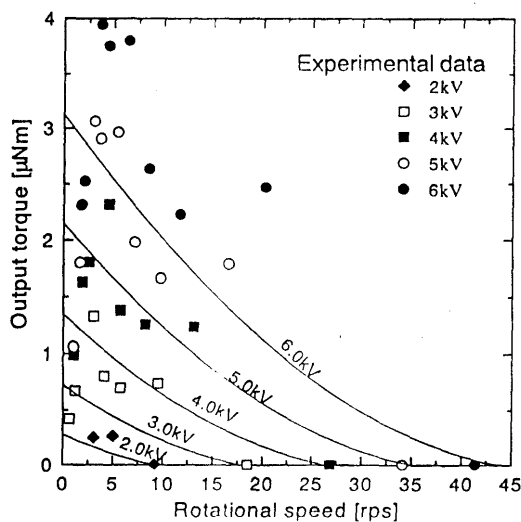


Fig. 17 Static characteristics between output torque and rotational velocity (I.D.  $\phi 3$  mm)

is suitable for use as a micro motor.

## 7. Conclusions

Using ECF, which is a kind of functional fluid, new-principle micro motors are proposed and fabricated. The proposed SE-type ECF motor has a rotor with vanes that can be rotated by ECF jets produced from electrodes on the inner surface of the stator. In addition, SE-type ECF micro motors with ID  $\phi 8$ , ID  $\phi 4$  and ID  $\phi 3$  are fabricated and investigated experimentally. The results obtained are as follows:

- (1) The rotational velocity of the motor under

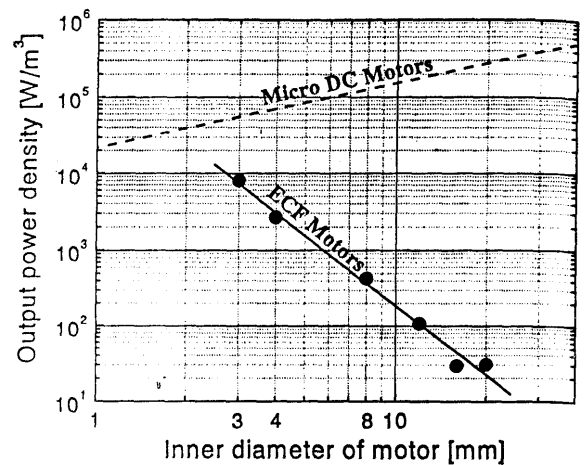


Fig. 18 Miniaturization characteristics of ECF motors for power density

no-load condition is proportional to the applied voltage, and a sufficiently high velocity is obtained.

(2) Load characteristics are measured, and the output power and the efficiency are clarified.

(3) A mathematical model is proposed, and its validity is confirmed experimentally.

(4) ECF motors exhibit the tendency to increase the output power density with miniaturization. This tendency is suitable for their use as micro motors.

## References

- (1) Tsuchida, N., Ohsawa, J., Murata, R., Yamada, Y. and Imai, K., Studies on DC Micro Motor Employing EHD Stream by Ion Drag, *Trans. IEE Japan*, (in Japanese), Vol. 113-D, No. 12 (1993), pp. 1442-1447.
- (2) Higa, M., Maekawa, T., Kuwahara, K., Ohara, A., Kawasaki, K., Harada, T., Yoda, S. and Nakamura, T., Effect of Electric Field on Marangoni Convection under Microgravity, *J. Japan Soc. Microgravity Appl.*, Vol. 12, No. 1 (1995), pp. 19-26.
- (3) Yabe, A. and Maki, H., Augmentation of Convective and Boiling Heat Transfer by Applying an Electro-hydrodynamical Liquid Jet, *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 31, No. 2 (1998), pp. 407-417.
- (4) Yokota, S., Yoshida, K., Ohtsubo, Y. and Edamura, K., A Micromotor Using a Kind of Dielectric Fluids, *Conference Record of the 1996 IEEE Industry Application Society, 31st IAS Annual Meeting*, Vol. 3 (1996), pp. 1759-1754.
- (5) Yoshida, K. and Yokota, S., Study on High-Power Micro-Actuator Using Fluid Power, *Proc. 6th International Conference on Flow Measurement (FLOMEKO '93)*, Vol. 1 (1993), pp. 122-130.

電界共役流体(ECF)を応用したモータ\*  
(ディスクプレート形 ECF モータの提案)横田 眞一<sup>\*1</sup>, 佐瀬 大輔<sup>\*2</sup>, 近藤 豊<sup>\*1</sup>  
大坪 泰文<sup>\*3</sup>, 枝村 一弥<sup>\*4</sup>A Motor Using Electro-Conjugate Fluids (ECF)  
(Proposition of Disk Plate (DP)-Type ECF Motors)Shinichi YOKOTA<sup>\*5</sup>, Daisuke SASE, Yutaka KONDOH,  
Yasufumi OTSUBO and Kazuya EDAMURA<sup>\*5</sup> Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology,  
4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 226-8503 Japan

Recently, Y. Otsubo *et al.* reported that a kind of dielectric fluid such as dibutyl decanedioate produced jet-flow by applying high voltage electrostatic field. The fluids are called Electro-conjugate Fluid (ECF), and novel micromotors have been proposed by making use of ECF. In this paper, firstly, a disk plate type ECF motor by making use of ECF are proposed, whose feature is low height and like a flat plate. Secondly,  $t=0.2$  mm rotor is fabricated. With the fabricated rotor, basic characteristics of DP-RE type motors having 1.6 mm and 0.7 mm in inner height, such as rotational speed, load characteristics, output power, efficiency are experimentally examined. Consequently, it is confirmed that the output power density and the efficiency of the motors are higher by reduction on inner height. The characteristics are suitable for a low height motor.

**Key Words:** Actuator, Dielectric Fluid, Jet Flow, Electrostatic, Motor, Power Density, ECF, Smart Fluid, Functional Fluid, Disk Plate

## 1. ま え が き

デカン二酸ジブチル(dibutyl decanedioate;DBD)などのある種の誘電性流体に、線状電極を用いて直流高電圧を印加すると、電極間に噴流(ジェット)が生じる現象が著者の一人である大坪により見いだされている<sup>(1)(2)</sup>。その流動のメカニズムは今のところ明らかでないが、著者らは静電界により、誘電液体が、その導電率と誘電率の不均一性に起因して流体力学的不安定性を引き起こし、流動が発生すると考え、この流体を「電界共役流体 (Electro-Conjugate Fluid, ECF)」と呼んでいる。

ECF を機能性流体のひとつであると考え、ECF の流動現象をモータに応用することにより、従来には

ないシンプルな構造をもち、スイッチング回路が不要な DC モータが実現できる。また、電磁モータとはことなり、鉄心やコイルなどを用いる必要がなく、モータを軽量化することが可能である。

著者らは、すでにこの ECF を応用したマイクロモータとして、円筒状のステータ内壁に取り付けられた電極から噴流を発生させ、羽根形のロータが回転する構造の「円筒ステータ電極(C-SE)形 ECF モータ」と、

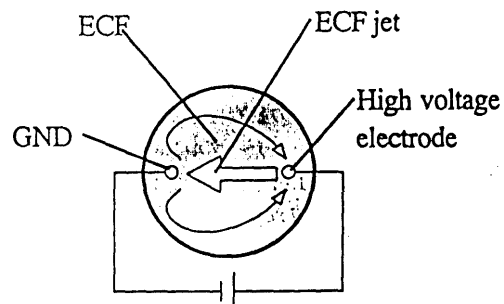


Fig. 1 Schematics of ECF effect

\* 原稿受付 2001年3月8日。

<sup>\*1</sup> 正員, 東京工業大学精密工学研究所(〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)。<sup>\*2</sup> 東京工業大学大学院。<sup>\*3</sup> 千葉大学工学部(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)。<sup>\*4</sup> 正員, 新技術マネージメント(〒124-0023 東京都葛飾区新小岩2-9-1-306)。

E-mail: syokota@pi.titech.ac.jp

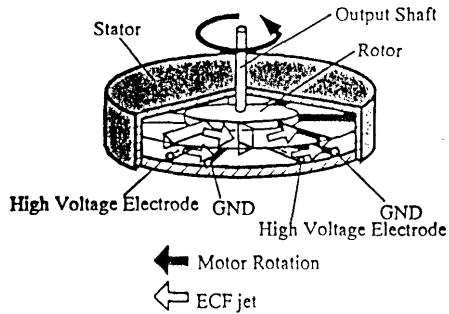


Fig.2 Schematics of DP-SE type ECF motors

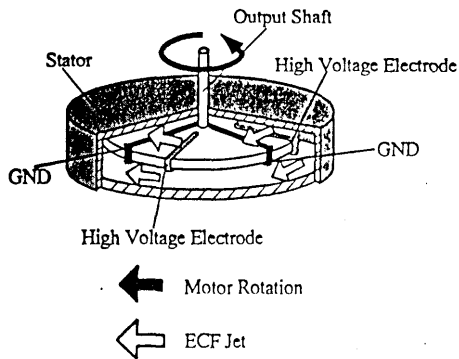


Fig.3 Schematics of DP-RE type ECF motors

円筒状のロータに取り付けられた電極から流動を発生させ、その反動で回転する構造の「円筒ロータ電極 (C-RE) 形 ECF モータ」を提案している<sup>9)</sup>。

本研究では、新たに、薄い円盤形構造の「ディスクプレート (DP) 形 ECF モータ」を提案する。構造の詳細については、第 2 章以降で述べるが、DP 形 ECF モータは電極を半径方向に配置していることから、すでに提案した C-SE 形、C-RE 形とくらべ、出力トルク、出力パワーがロータ厚さに依存しないことが期待でき、薄形化に適した構造になっている。DP 形 ECF モータの実現により、例えば薄形ノートパソコンの CPU 冷却ファンといった、狭い隙間などの特殊な環境での応用が考えられる。

本論文では、まず、ロータの薄型化について、その製作方法から検討している。ついで、試作した厚さ 0.2mm のロータを用いて、提案する DP 形 ECF モータの出力特性について実験的に検討している。

## 2. ディスクプレート形 ECF モータの提案

ECF は図 1 に示すように、ECF に線状の電極を挿入し直流高電圧を印加すると高電位側の電極からジェ

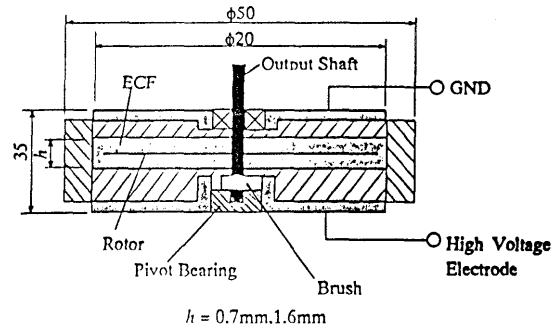
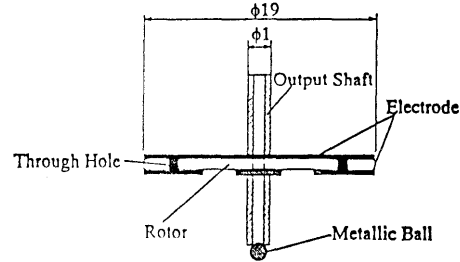


Fig.4 Structure of the fabricated DP-RE type ECF motor

Fig.5 Structure of the fabricated  $t=0.2\text{mm}$  rotor

ットが生じる (ECF 効果)。電極間隔によらず流速は、印加電圧にはほぼ比例する<sup>9)</sup>。これは、流速が平均電位勾配ではなく、高電位電極の極近傍における急激で非線形な電位勾配に依存しているためと思われる。図 2 および図 3 に本論文で提案するディスクプレート (DP) 形 ECF モータの概念図を示す。提案する DP 形 ECF モータは、大きく「ディスクプレート・ステータ電極 (DP-SE) 形」と「ディスクプレート・ロータ電極 (DP-RE) 形」の 2 つに分類される。

図 2 に示す DP-SE 形は、線状電極対を薄い円筒容器内壁の上面および下面に半径方向に配置する。容器内を ECF で満たし、電極へ電圧を印加することにより、容器内に ECF の旋回流が形成される。この容器内に羽根を有する薄い円板形ロータを挿入することで、ECF の流れの力をモータの回転力として取り出すことが可能となる。

図 3 に示す DP-RE 形は、薄い円板形ロータの上面および下面に線状電極対を半径方向に配置する。このロータを ECF で満たされた薄い円筒容器内に挿入し、電圧を印加すると、ロータの上下面にジェットが生じる。ジェットの反力によりロータは回転する。

DP 形 ECF モータは、電極対がロータまたはステータの上下面に配置されていることから、ロータ厚さ

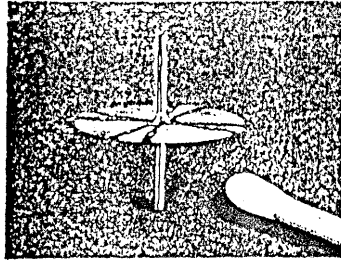


Fig. 6 Photocopy of the fabricated  $t=0.2\text{mm}$  rotor

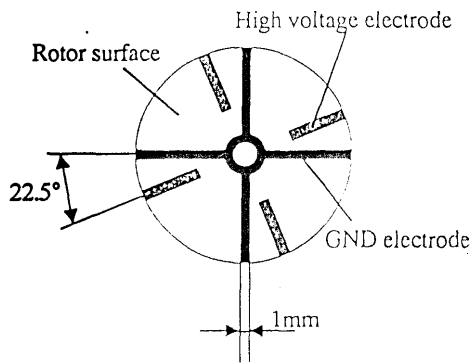


Fig. 7 Electrode layout on the rotor surface

に出力特性が依存しないことが明白であり、薄形モータに適した構造となっている。

予備実験より、DP-RE 形は DP-SE 形に比べ、高出力、高効率が可能である。DP-RE 形は、直接ジェットの流れを回転力として取り出しているため、DP-SE 形に比べ、高出力、高効率になると考えている。本論文では、予備実験の結果を踏まえ、より実用であると認められる DP-RE 形 ECF モータについて検討する。

### 3. DP-RE 形 ECF モータの試作

試作した DP-RE 形 ECF モータの構造を図 4 に示す。外径  $\phi 50\text{mm}$ 、高さ  $35\text{mm}$  である。ECF が充填されるモータ内部の寸法は内径  $\phi 20\text{mm}$  であり、内部高さは  $1.6\text{mm}$  から  $0.5\text{mm}$  の間で調整できる。ケーシング部にはエンジニアリングプラスチック (ULTEM<sup>®</sup>) およびアクリルを用いている。

ロータ部分の構造を図 5 に示す。また、外観写真を図 6 に示す。寸法は外径  $\phi 19\text{mm}$ 、厚さ  $0.2\text{mm}$  である。ロータはガラス布基材エポキシ樹脂板の両面に銅

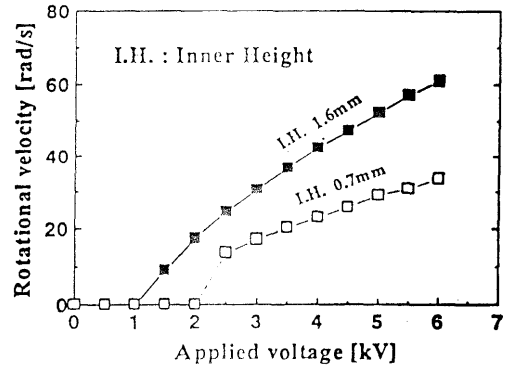


Fig. 8 No load characteristics between rotational velocity and applied voltage

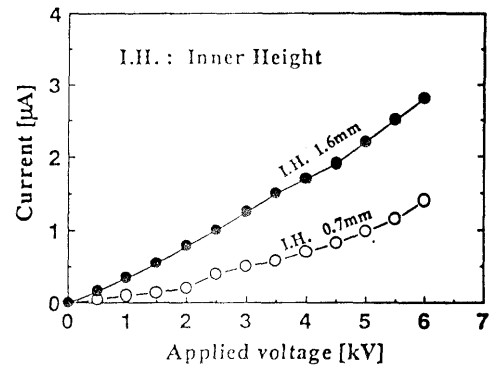


Fig. 9 No load characteristics between current and applied voltage

張りした基板を用いている。ベースとなる絶縁層の厚さは  $0.2\text{mm}$ 、銅箔層の厚さは  $18\mu\text{m}$  である。ロータ電極はフォトエッチング加工により形成されている。ロータ電極の形状は、図 7 に示すように、片面に放射状に 4 対の電極を配置し、両面で合計 8 対となっている。ロータ電極上下間の通電には電気回路のプリント配線基板で用いられているスルーホール方式を採用している。また、ロータ軸には外径  $\phi 1\text{mm}$  のステンレスパイプを用いている。

ロータ電極への通電はロータ軸を介しておこなっている。上部ロータ軸が GND 電極への通電、下部ロータ軸が高電位電極への通電に用いられている。上部ロータ軸へは、ボールベアリングを介して外部から通電している。また、下部ロータ軸へは、金箔ブラシを介して外部から通電している。

ECF モータは、ECF が充填された円筒部が本質的な部分であるので、この円筒部の径を「内径」、高さを「内部高さ」とよび、代表寸法として評価する。

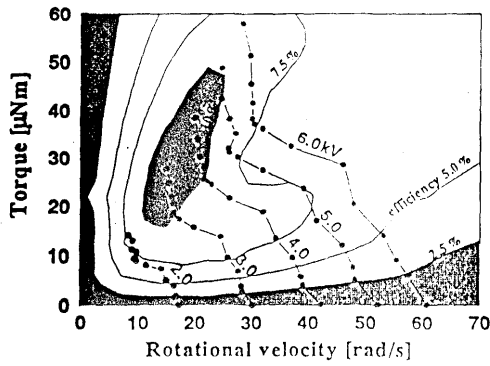


Fig. 10 Output torque characteristics and efficiency map (Inner Height: 1.6mm)

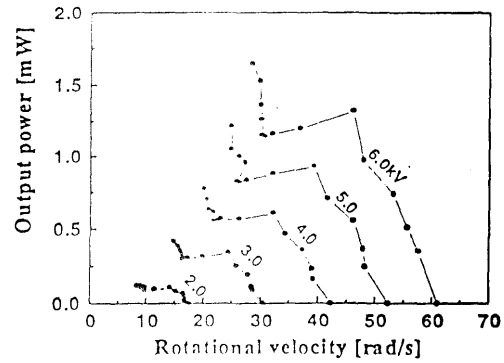


Fig. 12 Output power characteristics (Inner Height: 1.6mm)

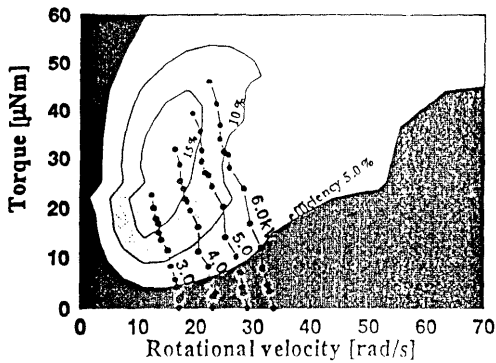


Fig. 11 Output torque characteristics and efficiency map (Inner Height: 0.7mm)

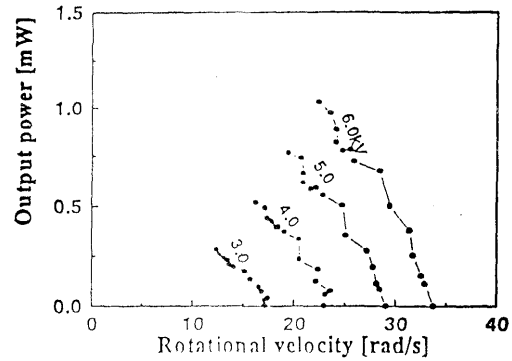


Fig. 13 Output power characteristics (Inner Height: 0.7mm)

#### 4. DP-RE 形 ECF モータの特性

4.1 無負荷特性 ECF にデカン二酸ジブチルを使用し、試作した DP-RE 形 ECF モータの内部高さを 1.6mm とした場合、および 0.7mm とした場合のそれぞれについて、無負荷時の印加電圧・回転速度間静特性および印加電圧・電流間静特性を測定した。測定結果を図 8 および図 9 に示す。内部高さ 1.6mm のとき、ロータとステータの間隔は 0.7mm、内部高さ 0.7mm のとき、ロータとステータの間隔は 0.25mm となる。図 8 および図 9 は同時に測定した結果である。

図 8 より 6kV 印加時に内部高さ 1.6mm のとき 61rad/s (580rpm)、内部高さ 0.7mm のとき 33rad/s (320rpm) が得られているのがわかる。また、回転速度が印加電圧にほぼ比例して増加しているのがわかる。このことは、DP 形 ECF モータがスピンドルモータとしてだけでなく、サーボモータとしても、応用可能であることを示している。

内部高さ 1.6mm の場合、印加電圧 1.5kV から、また、内部高さ 0.7mm の場合、印加電圧 2.5kV から回転を始めているが、これは摩擦トルクの影響である。摩擦トルクは、ロータ電極への通電のための電気接点が必要な原因と考えられる。図 9 より、電流値は 0kV より連続して増加しており、ロータが回転する以前から ECF ジェットは発生していると考えられる。摩擦低減を図ることにより、起動電圧を下げることは可能である。また、提案する DP 形 ECF モータは高電圧を必要とするものの、図 9 よりわかるように電流値としては  $\mu\text{A}$  オーダと小さい。必要とする電源ユニットは、出力の小さいもので十分であることがわかる。ちなみに、内部高さ 1.6mm のとき、図 9 の結果より換算すると、6kV 印加時の入力パワーは、17mW である。また、放電対策を十分におこなえば、さらに印加電圧を上げることは可能であり、さらに高速回転を実現できる。

4.2 負荷特性 出力軸に負荷を与え、そのときの出力トルクおよび消費電流を測定することで、試作

Table 1 Comparison between the I.H.1.6mm ECF motor and I.H. 0.7mm ECF

	Inner Height 0.7mm	Inner Height 1.6mm
Max. rotational Velocity [rad/s] (Ratio)	33 (0.6)	61 (1)
Max. torque [ $\mu\text{Nm}$ ] (Ratio)	46 (0.8)	58 (1)
Max. output Power[mW]	1.0 (0.6)	1.6 (1)
Max. Efficiency[%] (Ratio)	21 (1.6)	13 (1)
Output power Density[ $\text{W}/\text{m}^3$ ] (Ratio)	4.5 (1.4)	3.2 (1)

した DP-RE 形 ECF モータの出力特性および効率を検討する。ただし、DP 形 ECF モータの出力トルクは  $\mu\text{Nm}$  オーダの微小トルクであり、直接測定することは極めて困難である。既製のトルクセンサは使用できない。本論文では、小形軽量のプロペラの回転速度と回転に要するトルクの関係を用いる方法により、RE 形 ECF モータの出力トルクを測定している<sup>9)</sup>。

図 10 および図 11 の黒丸は、内部高さ 1.6mm および内部高さ 0.7mm の DP-RE 形 ECF モータの回転速度・出力トルク間静特性の測定結果を示す。ただし、印加電圧が 3.5kV, 4.5kV, 5.5kV のときも測定しているが、図が煩雑になるのを避けるため、プロットしていない。いずれも全体に右下がりの傾向があることがわかる。等電圧線図が極大、極小をもつような形になっているが、これは、トルク測定の精度が低く、不正確なためと考えている。トルク測定方法の原理上、回転速度がゼロのときの出力トルクは測定することができないが、測定した範囲内における最高トルクとして、内部高さ 1.6mm の場合 58 $\mu\text{Nm}$ 、内部高さ 0.7mm の場合 46 $\mu\text{Nm}$  を得ている。また、図 10 および図 11 には、消費電流の測定結果をもとに効率を算出し近似して求めた効率マップも示してある。ただし、測定範囲外は、外挿補間されたものであり、参考程度にみてもらいたい。効率として、内部高さ 1.6mm の場合 13% (@3kV, 15rad/s, 28 $\mu\text{Nm}$ )、内部高さ 0.7mm の場合 21% (@3.5kV, 15rad/s, 25 $\mu\text{Nm}$ ) を得ている。

図 12 および図 13 には、図 10 および図 11 の結果をもとに出力パワーを算出した結果を示す。図 12 および図 13 より、測定範囲内においては、最

大出力パワーとして、内部高さ 1.6mm の場合 1.6mW、内部高さ 0.7mm の場合 1.0mW が得られている。

プロペラによるトルク測定では、プロペラの自重が ECF モータに影響を与えることから、高負荷領域での測定が困難である。測定範囲が限られてしまうため、図 12 および図 13 の出力パワー特性にピークが現れていない。ピークが現れていないことは、より高負荷な領域で高出力が得られることを示している。ただし、著者の知る限り、他に適用可能な微小トルク測定方法はない。今後、本論文のようなマイクロアクチュエータの研究開発を進めるためには、微小トルクが測定可能な簡便な測定方法を考案することが、必要である。

## 5. 内部高さの影響についての考察

内部高さ 1.6mm DP-RE 形 ECF モータと内部高さ 0.7mm DP-RE 形 ECF モータの特性を比較した結果を表 1 に示す。表中の出力パワー密度とは、計測最大出力パワーを ECF が充填された容積で除した値である。

測定範囲が限られていることから、定量的に厳密な比較はできないが、最大回転速度、出力トルク、出力パワーといった特性は内部高さを小さくすると低下する傾向にある。一方、効率は内部高さ 0.7mm の方が向上している。また、内部高さを小さくすることにより、出力パワーは低下するが、出力パワー密度での評価では向上している。

内部高さを小さくすると粘性摩擦がより影響すると考えられるが、効率および出力パワー密度が向上するのは興味深いと考える。さらに入力電流値が上げられて、ECF ジェットを強力にできると、よりパワー密度の大きなマイクロモータが実現できる。

電磁モータは、薄形化、マイクロ化することで出力パワー密度は、原理的に低下する。提案する DP-RE 形 ECF モータは、薄形化により出力パワー密度の向上が得られた。このことは、DP-RE 形 ECF モータが薄形モータとして適した特性を有していることを示している。

## 6. あとがき

本論文では、薄い円盤形構造の「ディスクプレート(DP)形 ECF モータ」を提案した。DP 形 ECF モータは、大きくロータ電極(DP-RE)形およびステータ電極

(DP-SE)形に分けることができる。本論文では、高出力が期待できる DP-RE 形について、試作および検討した。また、ロータの薄形化を実現するため、プリント基板の製作方法を応用した。ロータ製作方法を考案した。得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) 考案したロータ製作法により、DP-RE 形 ECF モータのロータの厚さを 0.2mm まで薄形化できることを示した。
- (2) DP-RE 形 ECF モータの、無負荷回転速度、出力トルク、出力パワーは、ロータ厚さが同じ場合、内部高さが小さくなると、低下する傾向にあることを示した。
- (3) DP-RE 形 ECF モータの内部高さを 1.6mm から 0.7mm へ小さくした場合、効率、および出力パワー密度は向上すること示した。

今後の課題としては、起動トルク、静止トルクも測定可能な微小トルク測定方法を提案および検証し、ECF モータの出力特性を詳細に検討すること、モータ

内部の流れを明らかにし、より高効率化を図ることが挙げられる。

## 文 献

- (1) 大坪泰文, 枝村一弥, 誘電液体モータの開発, 第 44 回レオロジー討論会講演要旨集, (1996), 210-213
- (2) Otsubo, Y. and Edamura, K., Dielectric Fluid motors, *Apply. Phys. Lett.*, 71-3(1997), 318-320
- (3) 横田真一, 貞本敦史, 近藤 豊, 大坪泰文, 枝村一弥, 電界共役流体 (ECF) を応用したマイクロモータ (ステータ電極 (SE) 形マイクロ ECF モータの提案), *機論*, 66-642, C(2000), 627-633
- (4) 横田真一, 根本敏之, 近藤 豊, 大坪泰文, 枝村一弥, 電界共役流体 (ECF) を応用したマイクロモータ (ロータ電極 (RE) 形マイクロ ECF モータの提案), *機論*, 66-651, C(2000), 3799-3804
- (5) 横田真一, 原 裕, 近藤 豊, 大坪泰文, 枝村一弥, 電界共役流体 (ECF) を応用したマイクロモータ (Disk-Plate-RE 形 ECF モータの提案とその出力特性), *日本機械学会 1999 年度年次大会講演論文集 (V)*, (1999), 227-228

#### IV. 新規マイクロポンプおよびインクジェット機構の開発

電場により液体中に発生するジェット流を制御して新規流体デバイス開発における基礎を確立することがこの研究の主目的である。この節では、ジェット流そのものを液体の輸送手段として利用するデバイスについて検討する。その基本は機械的駆動部のないマイクロポンプであり、電極からのジェット流だけで輸送を行うものである。循環流の規模よりはるかに長い距離における物質移動について検討する。ノズルなどを用いてこのジェット流を液体の表面を横切って噴出させるとインクジェットとしてプリンターやコーティングマシンに応用することが可能となる。また、空気中へ噴出したジェット流を制御し、他の容器に回収することができる。とチューブレスサイフォンとして空中輸送の手段になる。ここでは、細管中の流体に電場を印加したときに発生する圧力について検討し、さらにマイクロポンプおよびインクジェットの基本的挙動について液体物性と関連づけて検討する。

## ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動マイクロポンプ\*

横田 眞一<sup>\*1</sup>, 吉田 和弘<sup>\*1</sup>, 岡安 毅<sup>\*2</sup>  
川上 和英<sup>\*2</sup>, 大坪 泰文<sup>\*3</sup>, 枝村 一弥<sup>\*4</sup>

## An SMA-Driven Micropump Using ECF Jet Cooling

Shinichi YOKOTA<sup>\*5</sup>, Kazuhiro YOSHIDA, Takeshi OKAYASU,  
Tomohide KAWAUE, Yasufumi OTSUBO and Kazuya EDAMURA<sup>\*\*</sup> Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology,  
4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 Japan

For high power micromachines using fluid power in millimeter size, micropumps are needed as fluid power sources. An SMA or Shape Memory Alloy is one of promising actuators for micropumps, however, the response is very low on the cooling phase. To overcome the problem, the paper proposes an SMA-driven micropump using ECF jet cooling. The ECF or Electro-Conjugate Fluid is a new kind of dielectric functional fluid which produces jet flows between high DC voltage-applied rod electrodes and realizes a simple cooling mechanism. Firstly, the micropump is proposed and characteristics of the actuator using ECF jet cooling are experimentally investigated. Effectiveness of the ECF jet cooling is verified. Secondly, a micropump in 1 cm-cubic size is fabricated and the basic characteristics are experimentally investigated. The optimal parameters are obtained and the maximum output flowrate and pressure of 11 mm<sup>3</sup>/s and 0.18 MPa are realized. Finally, for an optimal design method, a mathematical model is derived and verified through simulations.

**Key Words:** Micromachine, Pump, Fluid Machinery, Actuator, SMA (Shape Memory Alloy), ECF (Electro-Conjugate Fluid), Thermal Response

## 1. ま え が き

発電施設の内径 10 mm 程度の細管内で検査、補修作業を行うマイクロメンテナンスシステムなどの実現を目指し、マイクロマシンの研究開発がすすめられている<sup>(1)(2)</sup>。このような作業を行うマイクロマシンを実現するため、著者らの一部は、高パワー密度でミリメートルサイズのアクチュエータに適した特長を有する流体パワーを用いたマイクロマシンの開発をすすめており<sup>(3)(4)</sup>、流体パワー源となるマイクロポンプが必要とされている。しかし従来の多くのマイクロポンプは液体あるいは気体の搬送用であり<sup>(1)</sup>、出力パワーは流体パワー源としては不十分である。著者らの一部は、ポンプ室となるペローズを圧電素子により共振駆動し吐出流量の増大を図った高パワー密度のマイクロポンプを開発しているが<sup>(5)</sup>、磁界により粘度制御可能な MR 流体<sup>(6)</sup>などの基底粘度が高い作動流体では減衰

が大きいため共振駆動は困難と考えられる。

SMA (Shape Memory Alloy, 形状記憶合金) はシンプルな構造で出力エネルギー密度が高いため高出力マイクロポンプ駆動の有望なアクチュエータの一つである。しかし冷却時の熱応答はきわめて遅く、ポンピング周波数、したがって吐出流量の増大は困難である。著者らの二人は、油圧比例制御弁のため、強制油冷などによりバンド幅を 60 Hz まで改善した SMA アクチュエータを実現している<sup>(7)</sup>。しかしその冷却機構は比較的大形となるためマイクロポンプへの適用は困難である。

そこで本論文では、ECF ジェットによる SMA アクチュエータのシンプルな液体強制冷却機構を用いた SMA 駆動マイクロポンプを提案する。ECF (Electro-Conjugate Fluid, 電界共役流体) は、直流高電圧を印加した線状電極間に自発的にジェット流(電極間隔 2 mm, 電圧 2 kV で流速 50 mm/s 程度)を生じる新しい機能性流体であり<sup>(8)</sup>、デカン二酸ジブチル (DiButyl Decanedioate, 以降、DBD と呼ぶ) などが知られている。提案する SMA 駆動マイクロポンプは、作動流体の粘度によらず大流量を吐出できると期待される。当然、各種の液体の搬送などにも応用可能である。

本論文では、まず、ECF ジェット冷却を用いた

\* 原稿受付 2000 年 2 月 8 日。

<sup>\*1</sup> 正員, 東京工業大学精密工学研究所 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)。<sup>\*2</sup> 東京工業大学大学院。<sup>\*3</sup> 千葉大学工学部 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)。<sup>\*4</sup> (有) 新技術マネージメント (〒124-0023 葛飾区東新小岩 2-9-1-306)。

E-mail: syokota@pi.titech.ac.jp

SMA 駆動マイクロポンプを提案し、その SMA アクチュエータの特性について実験的に検討する。次に、10 mm 立方サイズのマイクロポンプを試作し、その構造パラメータおよび基本特性に関する実験的検討を行う。最後に、最適設計手法確立のための第 1 段階として数学モデルを導出し、シミュレーションによりその妥当性を検討する。

2. ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動マイクロポンプの提案

2.1 提案するマイクロポンプの動作原理 提案するマイクロポンプの構造を図 1 に示す。本マイクロポンプは、周囲に軸方向に張られた SMA 細線により伸縮されるベローズ、ベローズの外側に配置され内面に ECF 用線状電極を有する円筒(以降、外側円筒と呼ぶ)および吸入側と吐出側の二つの逆止弁から構成される。SMA 細線は加熱により収縮することによりベローズを圧縮し、吐出側逆止弁を通して作動流体を吐出させる。冷却時にはベローズのばね力により SMA 細線は引き伸ばされ、吸入側逆止弁を通して作動流体を吸入しながらベローズは伸長する。パルス電流による通電加熱と冷却の繰返しによりポンピングは行われる。提案するマイクロポンプでは、熱応答性を高めるため SMA は細線とし、ベローズと外側円筒の間に満たされた ECF のジェット流により強制冷却を行う。なお熱は外側円筒の大きな表面積から環境に放熱される。

図 2 は SMA 細線の応力ひずみ線図の模式図である。提案するマイクロポンプでは、A 点は高压で吐出した状態、B 点は低压で吸入した状態に相当する。したがって吐出圧力  $P$  に対する吐出流量  $Q$  は、

$$Q = A_b x f = \begin{cases} Q_{max} \left( 1 - \frac{P}{P_{max}} \right) & (P < P_y) \\ 0 & (P \geq P_y) \end{cases}$$

$$P_y = \frac{A_s}{A_b} \sigma_{max}, Q_{max} = A_b L_s \epsilon_0 f, P_{max} = \frac{\epsilon_0 E_s A_s}{A_b}, \dots \dots \dots (1)$$

と求められる。ここで  $x, f, L_s, A_s, E_s$  および  $\sigma_{max}$  は、SMA 細線の変位、駆動パルス周波数、長さ、断面積の総和、縦弾性係数および降伏応力、 $A_b$  はベローズの有効断面積である。出力特性は、2 点  $(P, Q) = (0, Q_{max})$  と  $(P_{max}, 0)$  を結ぶ直線として表される。

2.2 SMA アクチュエータの基礎実験 図 3 に示す ECF ジェット冷却を用いた二つの SMA アクチュエータを試作し、特性実験を行った。図 3 (a) に示すモデル A は外側円筒内面に中心軸と平行に線状電極を配置したもので、中心軸と垂直な平面内で循環流を発生する。図 3 (b) に示すモデル B は外側円筒内面に中心軸と直交して線状電極を配置したもので、中心軸を含む平面内で循環流を発生する。SMA 細線には母相変態終了温度  $65^\circ\text{C}$ 、直径  $75 \mu\text{m}$ 、長さ  $14 \text{ mm}$  の Ti-50 Ni(at%) 細線を 4 本、ECF には DBD を用

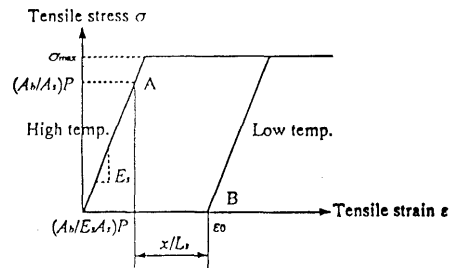


Fig. 2 Static characteristics of an SMA wire

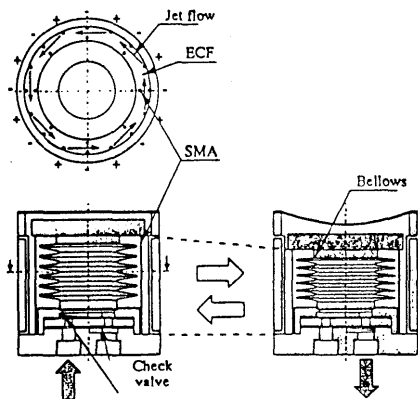


Fig. 1 Proposed SMA-driven micropump using ECF jet cooling

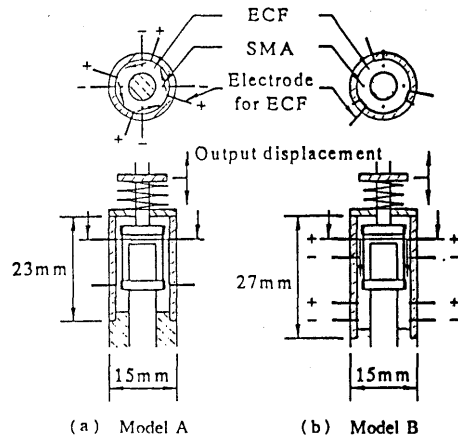


Fig. 3 Fabricated SMA actuators using ECF jet cooling

いる。アクチュエータ上部のばねのばね定数は 1.9 kN/m である。特性実験では、SMA 細線に周期的パルス電流を通電し、SMA 細線の収縮変位に相当する出力軸変位を測定レンジ 1 mm のリニアポテンシオメータで測定する。駆動電流のパルス幅は 20 ms であり、出力変位を測定し、振幅変化が 3% 以下となった定常状態において出力変位振幅を評価する。

図 4 は駆動パルス周波数 5 Hz におけるモデル A の出力変位の測定例である。出力変位はパルス電流通電時に急しゅんに増加し、電流が切られると回復している。ECF に電圧を印加しない場合、SMA の平均温度が高いため、図 4 (a) に示すように最大出力変位は大きく、変位振幅は小さい。ECF 印加電圧を増加すると、冷却性能が改善されるため図 4 (b), (c) のように最大出力変位は減少し、出力変位振幅は増大する。ECF ジェット冷却の効果は、出力変位波形の変化としても現れている。ただし ECF 印加電圧が高過ぎると、最大出力変位は小さくなるが相変態が十分に生じず図 4 (d) のように出力変位振幅は小さくなる。モデル B でも同様であった。

図 5 は駆動パルス周波数を 5 Hz としたときの出力変位振幅と ECF 印加電圧の関係を示す。SMA 細線

への供給電力は出力変位振幅が最大となる値を用いている。図 5 より、モデル A の方がモデル B より出力変位振幅が大きく、優れていることが確認された。

3. マイクロポンプの試作と特性実験

3.1 マイクロポンプの試作 図 6 に試作したマイクロポンプを示す。実験時に組立て、分解するためのねじ部を除いた有効サイズは直径 9 mm、高さ 10 mm である。電極配置はモデル A であるが、SMA 細線を ECF 電圧印加用負電極としても用いたシンプルな配置の検討のため、図 6 (b), (c) に示すモデル A<sub>1</sub> およびモデル A<sub>2</sub> を試作した。SMA 細線は母相変態終了温度 65°C、直径 75 μm、長さ 6 mm の Ti-50 Ni (at%) 細線 8 本、ECF は DBD である。ペローズは外径 6.2 mm、高さ 2.0 mm、有効断面積 19 mm<sup>2</sup>、ばね定数 8.9 kN/m である。逆止弁の弁体は厚さ 20 μm

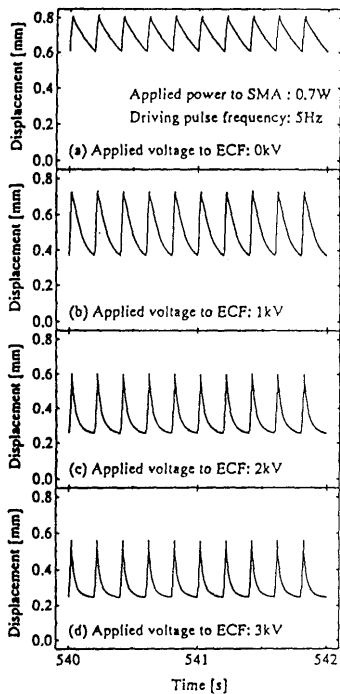


Fig. 4 Measured output displacement of SMA actuator model A

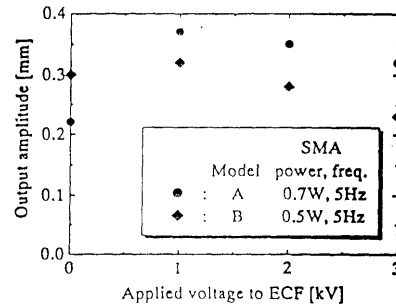


Fig. 5 Measured amplitude of SMA actuators

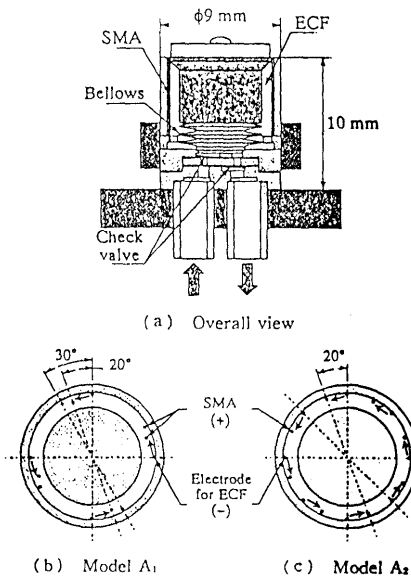


Fig. 6 Fabricated micropump

(空気中での共振周波数 6 kHz)であり、電鋳加工により製作している。作動流体は水道水(粘度 1 mPa·s)である。

**3・2 無負荷吐出流量** 無負荷特性について検討した。吐出流量は 120 s 間の吐出体積をメスシリングにより測定し求めている。ペローズの出力変位は測定レンジ 1 mm の静電容量形変位センサで測定している。駆動電流パルス幅は 20 ms であり、各測定データはサンプリング周波数 1 kHz で A/D 変換され、パーソナルコンピュータに入力される。ECF の最大印加電圧は放電が生じない 2 kV である。

**3・2・1 ECF 用電極配置** 図 7 は吐出流量と SMA 供給電力の関係をモデル A<sub>1</sub> について示す。黒塗りの記号は測定値、白抜きの記号は出力変位振幅にペローズ有効断面積および駆動パルス周波数を乗じた推定値を示す。測定流量と推定流量は定性的にはほぼ一致することが確認された。また ECF 印加電圧 2 kV, SMA 供給電力 0.45 W のとき、最大吐出流量が得られることが確認された。モデル A<sub>2</sub> も同様である。

図 8 は吐出流量と駆動パルス周波数の関係を示す。ECF 印加電圧は 2 kV, SMA 供給電力は 0.45 W である。駆動パルス周波数 5 Hz 未満では、SMA 細線が瞬間的に過熱するため測定不可能であった。結果と

して、モデル A<sub>1</sub> の方がモデル A<sub>2</sub> に比べ大きな吐出流量が得られた。以下ではモデル A<sub>1</sub> を用いる。

**3・2・2 SMA 母相変態終了温度** SMA 細線の母相変態終了温度が高く環境との温度差が大きいと、外側円筒からの放熱量が増すため応答性が改善される可能性がある。そこで母相変態終了温度 100°C の SMA を適用してみた結果、最大変位振幅 57 μm と母相変態終了温度 65°C の場合の値 50 μm と比べ大きい値が得られた。以下では母相変態終了温度 100°C の SMA を用いる。

**3・2・3 逆止弁の弁体厚さ** 弁体が厚いと開度が小さいため逆止弁における圧力損失が大きくなり、逆に薄いと機械的強度が低下すると考えられる。そこで弁体の厚さ 20 μm と 10 μm (空気中での共振周波数 3 kHz) の場合について吐出流量を測定した。その結果、弁体厚さ 10 μm において大きい吐出流量が得られ、永久変形も見られないことが確認された。以下では逆止弁厚さ 10 μm を用いる。

**3・2・4 駆動電流パルス幅** 本マイクロポンプでは強制冷却が加熱時にも継続されるため、高温時に十分な相変態を生じさせるためにはその分高いエネルギーの供給が必要である。この不要な加熱を避け、冷却媒体を低温に保つためには駆動電流パルス幅は小さい方がよいと考えられるので、これを実験的に検討した。

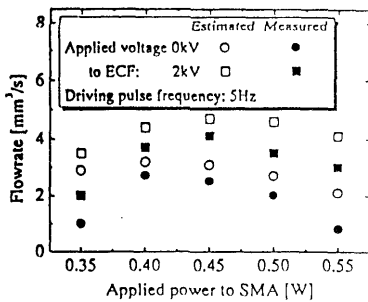


Fig. 7 No-load output flowrate of the fabricated micropump model A<sub>1</sub>

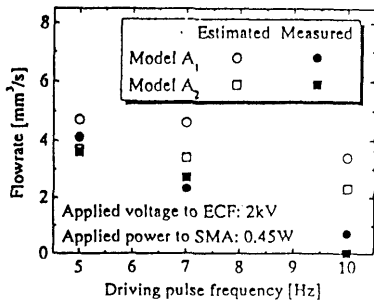
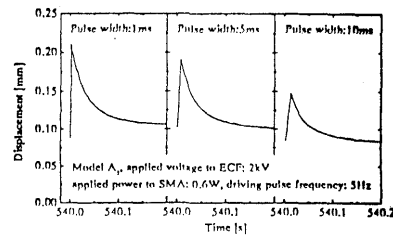
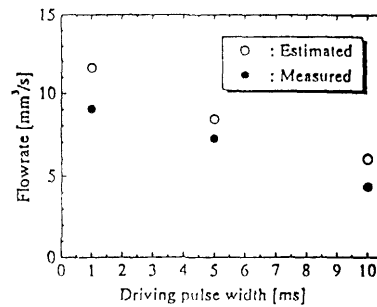


Fig. 8 No-load output flowrate of the fabricated micropump



(a) Output displacements



(b) Output flowrate

Fig. 9 No-load output flowrate with different driving pulse width

図9(a)はペローズの出力変位, 図9(b)は吐出流量と駆動電流パルス幅の関係を示す。ただしパルス幅1ms未満では、瞬時大流量により逆止弁弁体の永久変形が見られている。図9より、小さいパルス幅で吐出流量が大きいことが確認された。さらに、パルス幅1msにおいてSMA供給電力を変え吐出流量を測定した結果、最終的にSMA供給電力0.7Wにおいて無負荷吐出流量11mm<sup>3</sup>/sが実現された。

**3.3 負荷印加時の吐出流量** ポンプ性能として負荷印加時の吐出流量を測定した。小流量で負荷圧力を印加するため、吐出ポートに負荷用ペローズを取付けた。このときポンプ吐出流量、すなわち負荷用ペローズの流入流量は、

$$Q = A_{bl} \frac{dx_{bl}}{dt} = A_{bl} \frac{d(PA_{bl}/K_{bl})}{dt} = \frac{A_{bl}^2}{K_{bl}} \frac{dP}{dt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と与えられる。ただし  $x_{bl}$ ,  $A_{bl}$ ,  $K_{bl}$  は負荷用ペローズの変位, 有効断面積およびばね定数であり,  $P$  はポンプ吐出圧力,  $t$  は時間である。

実験では、吐出流量  $Q$  を吐出圧力  $P$  の測定値から式(2)により求めた。負荷用ペローズの有効断面積37mm<sup>2</sup>, 長さ13mm, ばね定数8.8kN/mである。吐出圧力  $P$  は測定レンジ0.2MPaの半導体形圧力センサで測定し、サンプリング周波数10HzでA/D変

換しパーソナルコンピュータに入力している。

図10(a)は吐出圧力の時間変化である。若干の乱れはあるがほぼ一次遅れ応答の波形であり、最大吐出圧力0.18MPaが得られた。図10(b)は吐出圧力と図10(a)の結果から一次遅れ応答波形を仮定し求めた吐出流量の関係を示す。出力特性が2.1節で述べたように直線状であることが確認された。

4. 熱収支に基づく数学モデルの構築

**4.1 熱収支に基づく数学モデル** 最適設計手法確立の第1段階として、熱収支に基づく数学モデルを構築した。SMA細線は十分に細いため断面内におけ

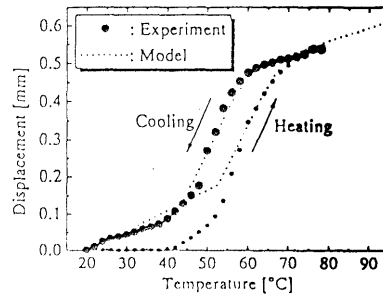
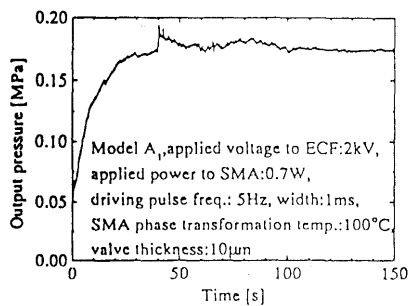
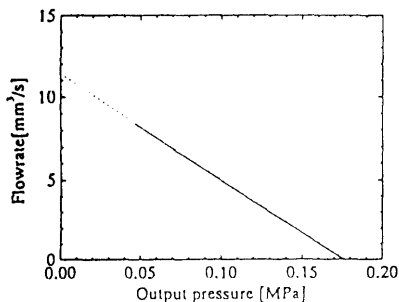


Fig. 11 Static characteristics of an SMA wire with phase transformation temperature of 65°C



(a) Time history of output pressure



(b) Relation between flowrate and output pressure

Fig. 10 Measured output characteristics under load

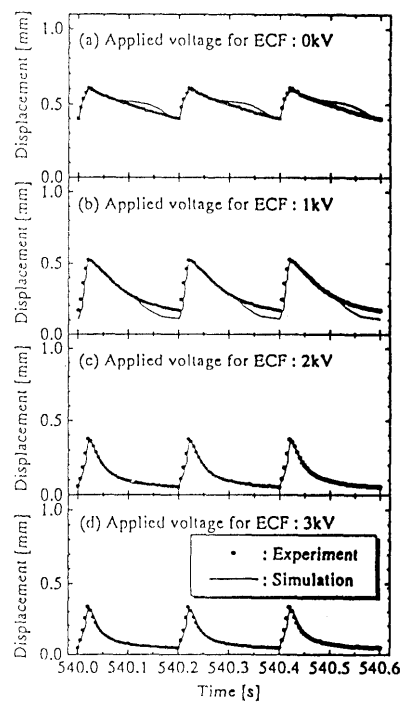


Fig. 12 Simulation results of SMA actuator model A

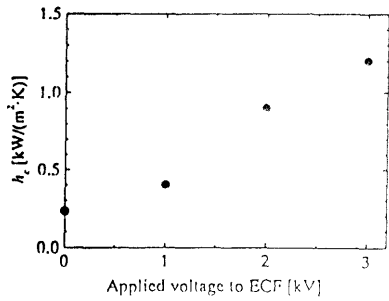


Fig. 13 Identified heat transfer coefficient  $h_c$

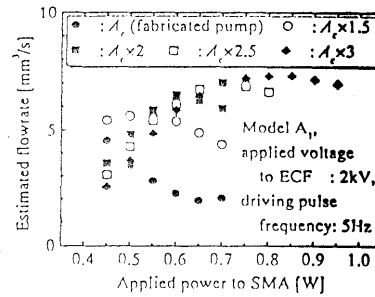


Fig. 15 Simulation results with different surface area  $A_e$  of outside cylinder

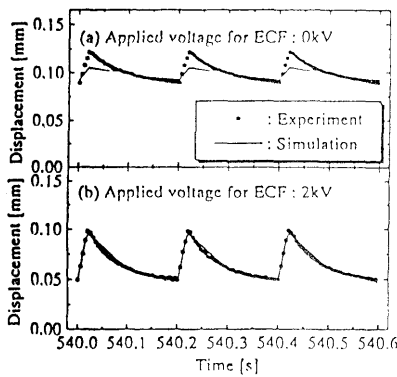


Fig. 14 Simulation results of micropump with SMA phase transformation temperature of 65°C

る温度分布は一様であり、また外側円筒の肉厚は十分に小さく熱抵抗は十分に小さいと仮定すると、熱エネルギーの収支より、

$$M_s C_s \frac{dT_s(t)}{dt} = q(t) - h_c A_s (T_s(t) - T_c(t)) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$M_c C_c \frac{dT_c(t)}{dt} = h_c A_s (T_s(t) - T_c(t)) - h_e A_c T_c(t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

が成立する。ただし  $M$  は質量、 $A$  は表面積、 $C$  は比熱、 $T(t)$  は環境に対する相対温度、添字  $s, c$  は SMA および ECF を表し、 $h_c$  は SMA と ECF 間の熱伝達率、 $h_e$  は ECF と環境間の熱伝達率、 $q(t)$  は SMA 供給電力瞬時値である。図 11 は母相変態終了温度 65°C の SMA 細線の静特性の測定例であり、破線は 1 次および 5 次曲線を接続した本数学モデルで用いる近似曲線である。ただし本実験でほとんど使用しない領域は簡略化している。

図 12 は 2.2 節で述べた SMA アクチュエータモデル A のシミュレーション結果である。ただし熱伝達率  $h_c$  は同シミュレーションにより同定した図 13 の

結果を用いている。出力変位波形が良好に一致することが確認された。図 14 は母相変態終了温度 65°C の SMA を用いたマイクロポンプに対し図 13 の熱伝達率  $h_c$  を用いた結果である。ECF 印加電圧 2 kV では良好な一致をみている。

4.2 ポンプ性能の改善 マイクロポンプの吐出流量の増大について検討するため、外側円筒の表面積  $A_e$  を変え吐出流量を 4.1 節で得られた数学モデルを用い求めた。図 15 にシミュレーション結果を示す。SMA 母相変態終了温度は 65°C である。外側円筒表面積の増加により吐出流量を増大できることが確認された。

5. あとがき

本論文では、作業を行う実用的な流体駆動形マイクロマシンの流体パワー源として、ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動マイクロポンプを提案、試作し、その特性について実験的、理論的に検討した。得られたおもな結論は以下のとおりである。

- (1) ECF ジェット冷却を用いた SMA 駆動マイクロポンプを提案した。
- (2) SMA アクチュエータおよび直径 9 mm、高さ 10 mm のマイクロポンプを試作し特性実験をおこない、提案する手法の有効性を確認するとともに、最適パラメータを実験的に求めた。その結果、最大吐出流量 11 mm<sup>3</sup>/s および最大吐出圧力 0.18 MPa を実現した。
- (3) 熱収支に基づく数学モデルを構築し、マイクロポンプの吐出流量増大についてシミュレーションにより検討した。

文 献

(1) Proc. IEEE 10th Annual Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS' 97), (1997).

- (2) 北原時雄, 産業科学技術研究開発制度における「マイクロマシン技術」, 機誌, 97-905(1994), 255-258.
- (3) 吉田和弘・横田眞一, 流体パワーを用いたマイクロアクチュエータに関する研究(第1報, 微小化に適したアクチュエータ方式の検討と管内走行機械への応用), 油圧と空気圧, 25-2(1994), 281-288.
- (4) 吉田和弘・高橋健・横田眞一, 流体パワーを用いた管内走行マイクロマシン(管径に適応できるメカニズム), 機論, 62-601, B(1996), 3341-3346.
- (5) 朴重源・横田眞一・吉田和弘, 共振駆動を用いた高パワー密度の圧電マイクロポンプ, 機論, 65-631, C(1999), 1071-1077.
- (6) 吉田和弘・高松環・横田眞一, MR 流体を駆動流体としたマイクロバルブ(マイクロ磁気回路の検討), 機学山梨講演会論集, (1999-10), 131-132.
- (7) 横田眞一・吉田和弘・坂東賢一・須原正明, 形状記憶合金アレイアクチュエータを用いた小形比例弁, 機論, 62-593, B (1996), 224-229.
- (8) 横田眞一・貞本敦史・近藤豊・大坪泰文・枝村一弥, 電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ(ステータ電極(SE)形マイクロ ECF モータの提案), 機論, 66-642, C(2000), 627-633.

## **IV-2 A New Inkjet Device on the Basis of Electrohydrodynamic Mechanism**

**Kazuya Edamura**

*New Technology Management Co., Higashi-Shinkoiwa 2-9-1-306,  
Katsushika-ku, Tokyo 124-0023, Japan*

**Yasufumi Otsubo**

*Department of Urban Environment Systems, Faculty of  
Engineering, Chiba University, Yayoi-cho 1-33, Inage-ku,  
Chiba-shi 263-8522, Japan*

### **Abstract**

A new type of inkjet system is proposed on the basis of electrohydrodynamic(EHD) effect. On the application of high DC electric fields to some insulating oils, a fluid jet with a velocity of about  $1 \text{ ms}^{-1}$  is created from the positive electrode as a bulk flow. By controlling the EHD flow to issue across the free surface, the inkjet device is developed, of which the nozzle unit is simply composed of a needle electrode and capillary. When the oils are subjected to high electric fields, the inkjet is generated above a critical threshold and the height increases with increasing voltage. The critical voltage strongly depends on the nozzle geometry. The height of inkjet at high voltages increases with decreasing viscosity and conductivity of oils. The performance of inkjet based on the EHD jet can be improved by a combination of designs of nozzle geometry and material functions.

\*) Submitted to Journal of Imaging Science and Technology

## Introduction

The inkjet printers have made remarkable progress in production of high quality images. In inkjet printing, uniformly sized droplets are ejected from a nozzle by breakup of fluids. The droplet formation process is initiated by application of pressure to the fluid in a reservoir. When subjected to mechanical vibration, the periodical disturbance leads to the instability of fluid motion and causes a jet to issue from the nozzle. The primarily important parameters controlling the breakup behavior of jet flow are the surface tension and viscosity of fluids, the mode of excitation signal, and the nozzle geometry.<sup>1</sup> The stimulation of fluids is generally introduced by the use of a piezoelectric transducer. In typical printing systems, the droplets with diameters around 15  $\mu\text{m}$  are created at a rate of approximately 1 MHz. For high quality printing, the research trends are focused on the size reduction of droplets and recently a new system has been developed in which the fine droplets(mist) with an average diameter of 2.5  $\mu\text{m}$  are ejected by ultrasonic waves at a frequency of 10 MHz.<sup>2</sup> The great advantages of this technique is that the droplet size can be changed by frequency of ultrasonic waves without a nozzle.

The application of high electric fields to insulating oils often generate electric body forces due to the nonuniformity of electric conductivity and dielectric constant. In DC fields, the Coulomb force acting on a space charge dominates the dielectrophoretic force. Under certain conditions, the Coulomb force can cause a hydrodynamic instability. The secondary motion of fluid, which is produced in high electric fields is known as the electrohydrodynamic(EHD) effect.<sup>3-6</sup> The EHD effect can give rise to interesting phenomena such as convection, turbulence, and chaos. In electric fields, ionic mobility has been reported<sup>7, 8</sup> to be about  $10^{-8} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  in dielectric fluids with viscosity of a few mPas. Based on the ionic mobility, the velocity of secondary flow can be estimated as  $1 \times 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$  in an electric field of  $1 \text{ kVmm}^{-1}$ . Numerical simulation and EHD experiments under

microgravity conditions in space also show that the velocity of the flow is about  $2 \times 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$  at a DC electric Rayleigh number of 6000 where the Coulomb force dominates the viscous force.<sup>9</sup> Much work demonstrates that the velocity of the EHD flow is of the order of  $10^{-2} \text{ ms}^{-1}$  in electric fields of several kV.

In previous papers, we have found that on the application of high DC fields to some insulating oils, a fluid jet with a velocity of about  $1 \text{ ms}^{-1}$  is created from the positive electrode. In this process, electric energy is directly converted to kinetic energy of the fluid. Since the high energy density can be generated, the EHD jet is very attractive in applications to new fluid devices. By controlling the velocity and direction of EHD jet, the authors have developed fluid motors<sup>10</sup> and electrorheological(ER) devices.<sup>11,12</sup> The electric fields acting on space charges produces not only the body forces in the bulk, but also the extra stresses across the interfaces. If the sufficiently high normal stresses are exerted, the continuous evolution of free surface from the nozzle exit can take place. In the present paper, we have studied the EHD method to generate the continuous liquid jet. The feasibility of providing new basic technology of inkjet printing systems will be discussed in relation to fluid properties.

## Experimental

### Samples

Eight kinds of insulating oils were used as model media of inks; dibutyl adipate(designated DBA; viscosity  $\eta = 3.5 \times 10^{-3} \text{ Pas}$  at  $25^\circ\text{C}$ , electrical conductivity  $\sigma = 3.8 \times 10^{-9} \text{ Sm}^{-1}$  in an electric field of  $2.0 \text{ kVmm}^{-1}$ ), dibutyl decanedioate(DBS;  $\eta = 7.0 \times 10^{-3} \text{ Pas}$ ,  $\sigma = 1.4 \times 10^{-9} \text{ Sm}^{-1}$ ), dibutyl maleate(DBM;  $\eta = 3.7 \times 10^{-3} \text{ Pas}$ ,  $\sigma = 3.3 \times 10^{-8} \text{ Sm}^{-1}$ ), dioctyl tetrahydrophthalate(DOTP,  $\eta = 4.0 \times 10^{-2} \text{ Pas}$ ,  $\sigma = 6.2 \times 10^{-10} \text{ Sm}^{-1}$ ), triacetin(TA,  $\eta = 1.4 \times 10^{-2} \text{ Pas}$ ,  $\sigma = 3.6 \times 10^{-9} \text{ Sm}^{-1}$ ), 2,2,4-trimethyl-1,3-

pentanediol diisobutyrate(TMPD,  $\eta = 4.0 \times 10^{-3}$  Pas,  $\sigma = 6.2 \times 10^{-9}$  Sm<sup>-1</sup>), 2,2,4-trimethyl-1,3-pentanediol monoisobutyrate(TMPM,  $\eta = 1.2 \times 10^{-2}$  Pas,  $\sigma = 6.8 \times 10^{-8}$  Sm<sup>-1</sup>), and fluorinated oil(FF3 manufactured by New Technology Management,  $\eta = 4 \times 10^{-4}$  Pas,  $\sigma = 2.5 \times 10^{-9}$  Sm<sup>-1</sup>). All the sample oils are Newtonian.

## Measurements

Figure 1 shows a schematic picture of nozzle unit. The inkjet nozzle consists of a needle electrode with a thickness of 0.1 mm and a capillary with a length of 5 mm. Various nozzles made of stainless steel were used, of which diameters  $D$  are from 0.2 mm to 1.2 mm. The distance between the tip of electrode and bottom of nozzle(called gap distance  $S$  in this paper) are adjusted in the range of 0 ~ 4.0 mm. The inkjet unit was so immersed in the fluid that the bottom of nozzle coincides the fluid level. A DC voltage was applied to the needle electrode and the nozzle was connected to the ground ( $E = 0$ ). The height of jet was determined by image analysis of photographs.

## Results and Discussion

### Effect of nozzle geometry

First of all, the geometrical effect of nozzle on the inkjet behavior is examined by the use of fluorinated oil which was newly formulated for the present study. On the application of high voltage, the continuous jet flow is almost instantaneously(within 50 ms) ejected from the nozzle. Figure 2 shows the jet height  $H$  plotted against the applied voltage  $V$  for the nozzle with a diameter of 0.2 mm at different gap distances. The jet issues when the voltage is increased above some critical level, which increases with increasing gap distance. Beyond the critical voltage, the plots are approximately correlated by a straight line. The height increase with decreasing gap distance although the annular entrance of fluid to nozzle becomes narrow. In

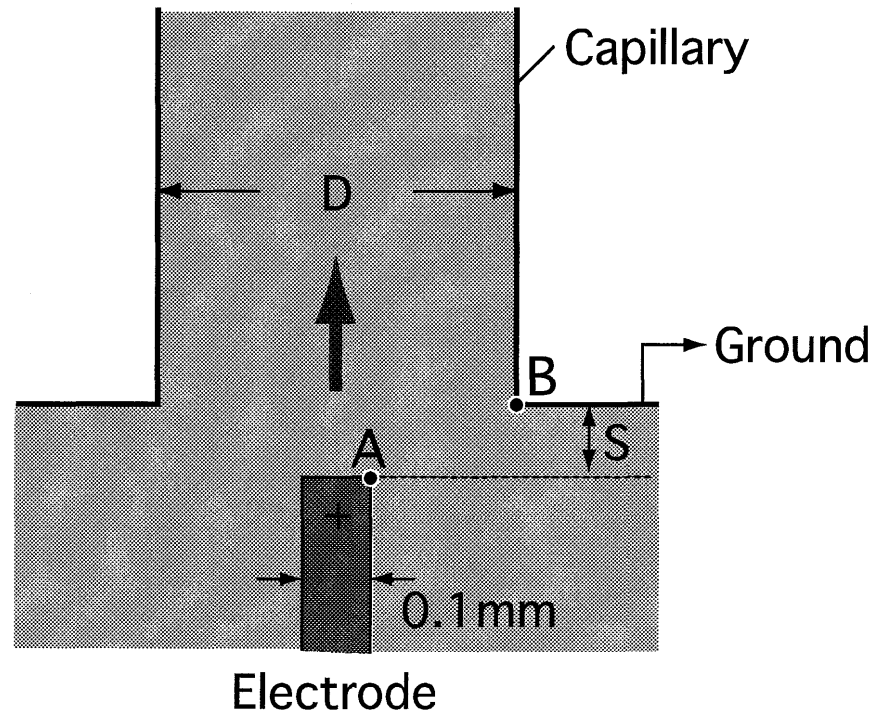


Figure 1 A schematic picture of nozzle unit consisting of a needle electrode with a thickness of 0.1 mm and a capillary with a length of 5 mm.

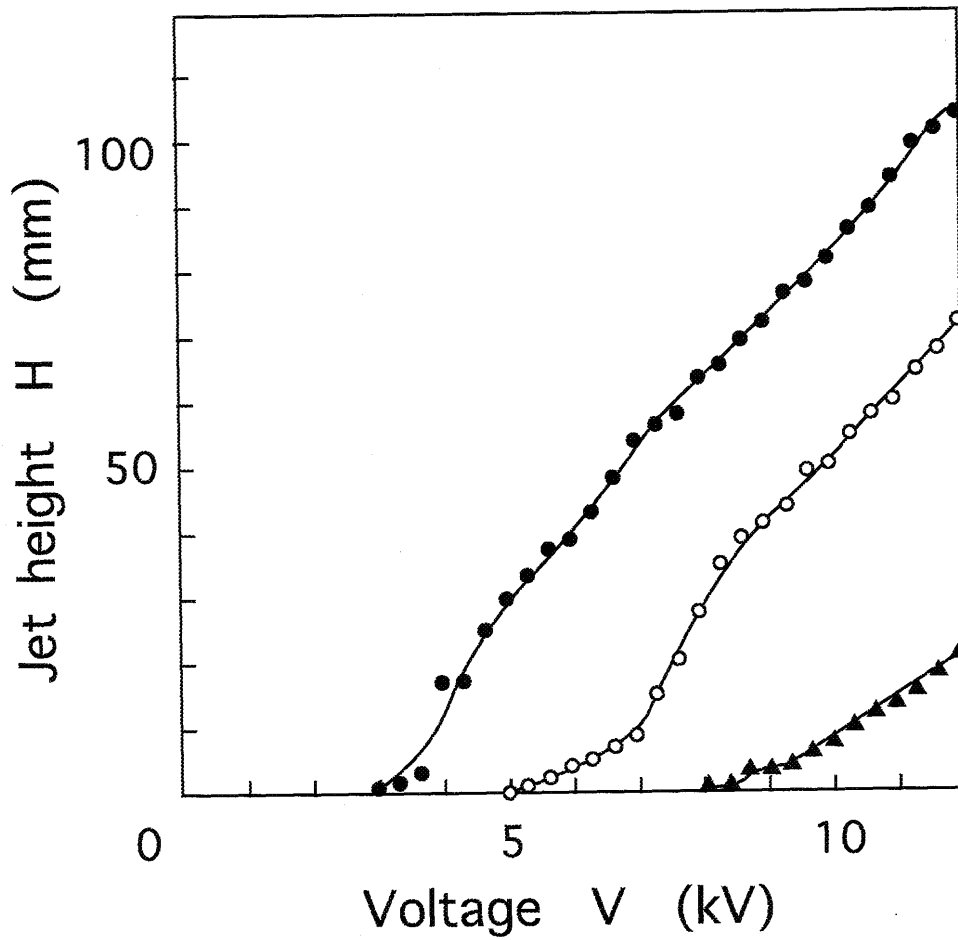


Figure 2 Jet height  $H$  plotted against the applied voltage  $V$  for the nozzle with a diameter of 0.2 mm at different gap distances; (●) 0, (○) 2.0, (▲) 4.0 mm.

this study, the maximum height was achieved at 12 kV by the use of nozzle with a diameter of 0.2 mm at zero gap distance and the value was about 100 mm. When the gap distance is increased up to 5 mm, the jet flow essentially disappears even at 12 kV. In the case of dielectric fluid motors,<sup>10</sup> the angular velocity increases with increasing applied voltage. However, there exists a critical value above which a steady rotation is achieved, below which the rotor only oscillates with the amplitude of oscillation gradually decreasing. On the performance of inkjet and motors, similar effects of field intensity are confirmed. The internal convective flow in the bulk can be connected to with the jet stream as the continuous evolution of free interface.

Figure 3 shows the jet height plotted against the applied voltage at zero distance for the nozzles with different diameters. Above the critical voltage, the jet height slowly increases at first and then begins to rapidly increase. Since the threshold voltage increases, the jet height rapidly decreases with increasing diameter. When the diameter increases above 1.0 mm, the height approaches zero. The thick nozzles hardly generate the effective jet flow.

The geometrical parameters determining the inkjet performance are the gap distance and nozzle diameter. To examine their contributions, the jet heights at 12 kV are shown as contour lines in Figure 4. The jet height decreases with increasing gap distance and nozzle diameter. It is considered that the field intensity plays an important role in generating inkjet. The field intensity is generally defined as the difference of voltages at two electrodes divided by their separation. Referring back to Figure 1, we can use the distance between points A and B to characterize the field intensity in nozzle. The dotted line in Figure 4 represents the equifield intensity curve at  $24 \text{ kVmm}^{-1}$ . The solid lines showing constant height and dotted line showing constant field intensity have a quite different profile. The results clearly indicate that the jet formation process is not scaled on the field intensity. The jet height is much more sensitive to horizontal separation.

Figure 5 shows the jet height at 12 kV plotted against the reciprocal cross section of nozzle at zero distance. Except for 1.2 mm nozzle, the plots are approximated by a straight line with a slope of 1. The product of jet

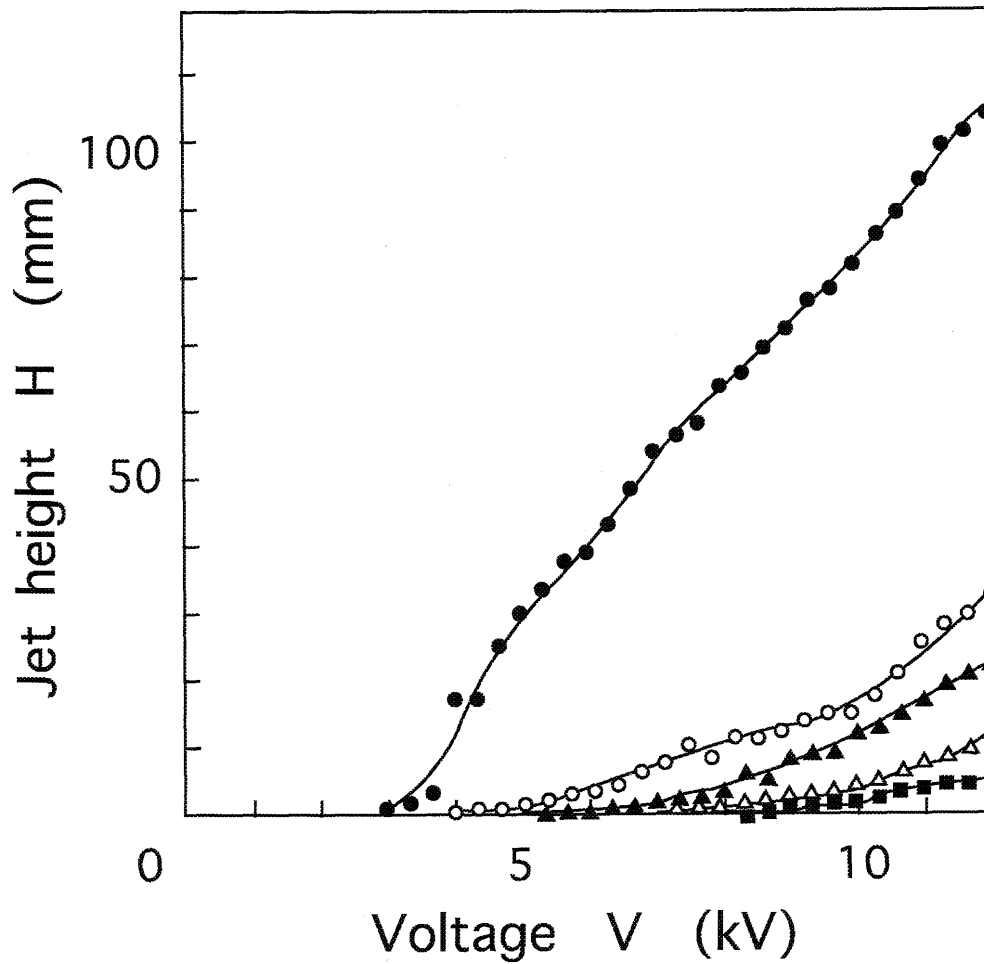


Figure 3 Jet height plotted against the applied voltage at zero distance for the nozzles with different diameters; (●) 0.2, (○) 0.4, (▲) 0.6, (△) 0.8, (■) 1.0 mm.

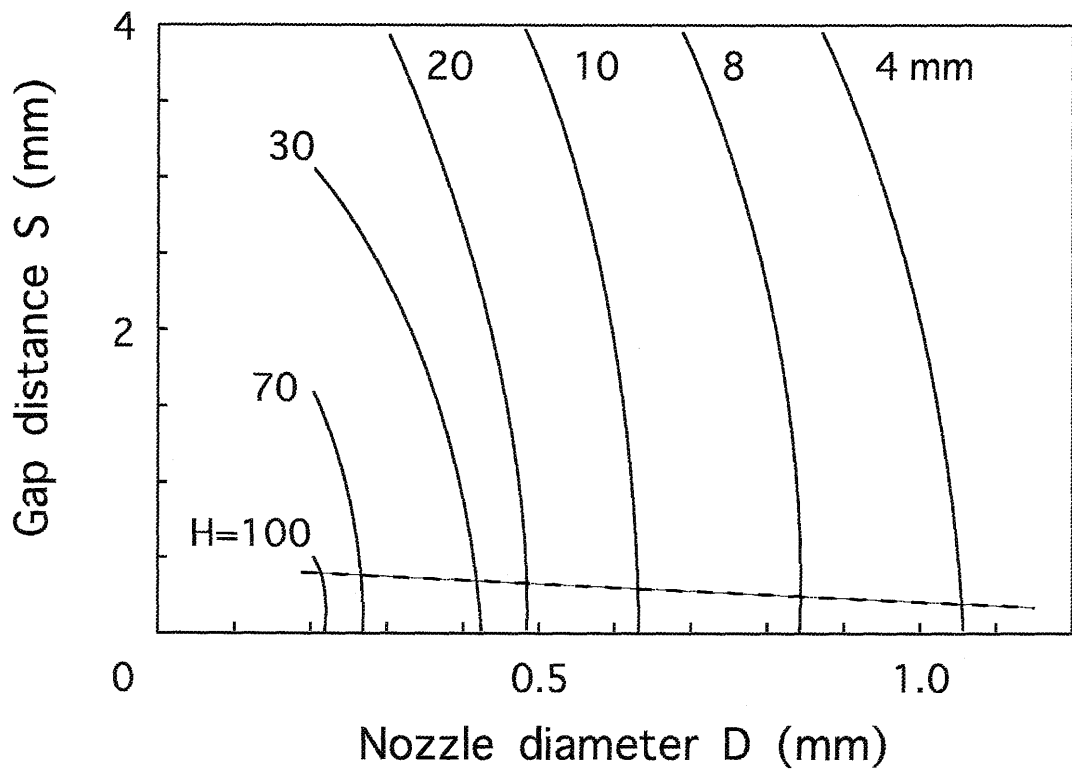


Figure 4 Contour lines showing jet heights at 12 kV as a function of nozzle diameter and gap distance. The dotted line is the equifield intensity curve at 24 kVmm<sup>-1</sup>.

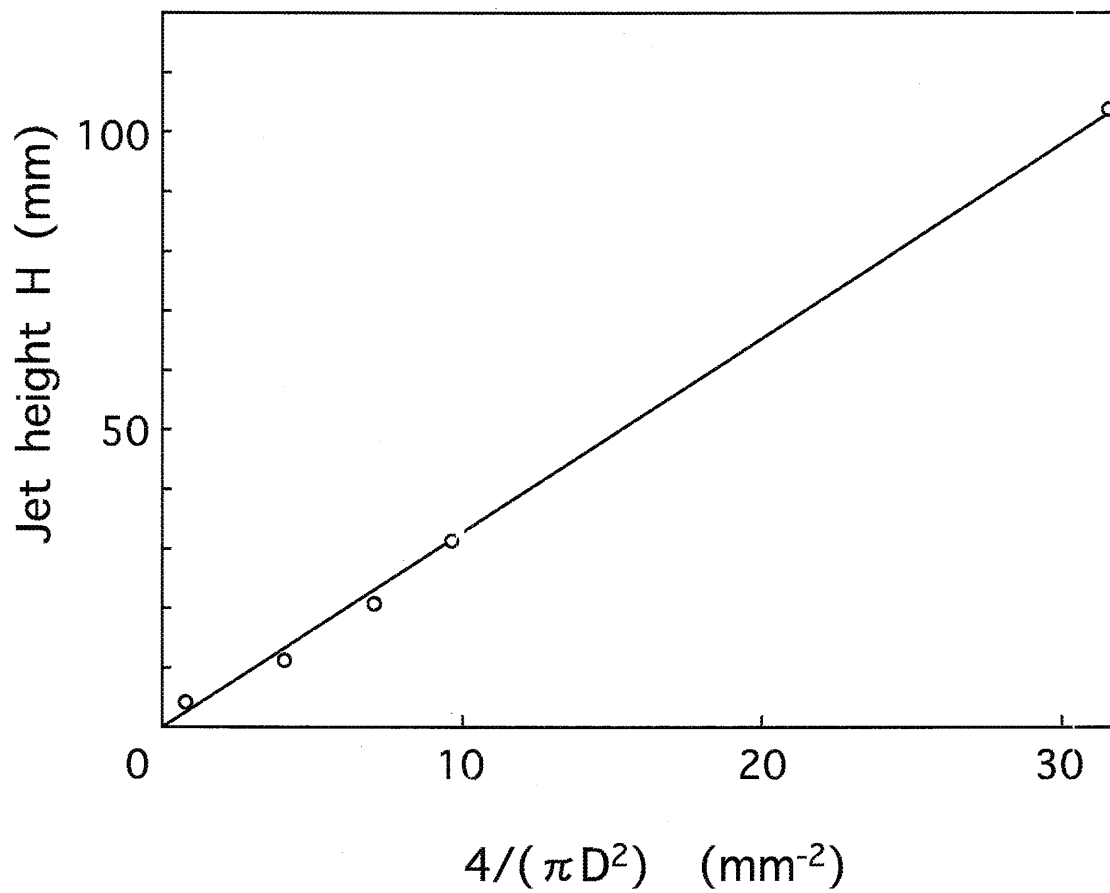


Figure 5 Jet height at 12 kV plotted against the reciprocal cross section of nozzle at zero distance.

height and cross section of nozzle is almost constant and this value can give a measure of pressure locally generated to raise the fluid elements. For formation of upward flow, the vertical force must be exerted on the fluid column in the nozzle. As a simplified approach, the force  $F$  can be estimated by the following equation;

$$F = \rho(\pi D^2/4) H g = (\pi D^2/4)P$$

where  $\rho$  is the density of fluid,  $P$  the pressure induced, and  $g$  the acceleration of gravity. The density of fluorinated oil being taken as  $1.430 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ , the obtained values of force and pressure are  $F = 40 \text{ }\mu\text{N}$  and  $P = 1.4 \text{ kPa}$ , respectively. In piezoelectric stimulation technique to impose a periodical disturbance into the jet issuing from a nozzle, typical pressures are reported to be about 0.5 MPa. The estimation for the proposed device is considerably low, compared with the experimental data for widely used systems. The forces induced by EHD jet from the positive electrode may be effectively converted to vertical flow of fluid column, although the nozzle is much thicker than the needle electrode. When the fluid column above the needle electrode starts to flow vertically, the fluid element in annular space is subjected to upward traction. Therefore, the continuous flow is kept in DC fields.

The flow patterns of EHD convection is very complicated and strongly depends on the geometry of vessel, electrode arrangement, field strength, and fluid properties. The EHD flow can form cell structures consisting of a collection of small circulation. In a previous paper,<sup>13</sup> we have reported the performance of fluid motors, which are composed of rotor with a diameter of 2 mm and stator(cylindrical case) with diameters of 3~4 mm. The motors can rotate at speeds of 3,000~15,000rpm. This implies that the high speed circulation takes place in the gap range of 0.5~1 mm. The volume of fluid in motors is comparable to that in inkjet nozzle. Therefore, the domain size of EHD circulation may be about 1 mm. Since the jet height is not sensitive to

the distance between the tip of electrode and bottom of nozzle, the EHD convection which develop to upward jet flow is induced near the electrode. The constant force independent of nozzle size can be attributed to the cooperative motion of fluid in the limited region just above the needle electrode.

### **Effect of fluid properties**

In previous papers,<sup>11,12</sup> we have reported that the pure oils whose viscosity hardly changes in uniform fields between metal electrodes with smooth surfaces can be ER-active (rapid increase in viscosity) when subjected to nonuniform fields in electrode with flocked fabrics. The ER effect arises from the EHD convection enhanced by the fibers on the electrodes. The ER behavior obtained by the use of electrodes with flocked fabrics can be summarized as follows: (a) The parameters determining the ER effect are the viscosity and conductivity of oils. (b) The relative viscosity, defined as the viscosity of oil in electric fields divided by that in the zero field, increases with decreasing oil viscosity and conductivity. To establish the ink formulation for the inkjet mechanism proposed in the present paper, it is essential to understand the EHD jet behavior as a function of material properties.

Figure 6 shows the jet height plotted against the applied voltage for various fluids. The experiments were carried out by the 0.2 mm nozzle at zero gap distance. For all fluids, the jet height shows a rapid increase above the critical voltage. Although the jet height at high voltages widely varies with the fluids, the critical voltage lie in the range of 3.0~5.0 kV except for TA. From Figures 2, and 3, the critical voltage strongly depends on the nozzle geometry. Once the inkjet issues from the nozzle, the performance is determined by the physical properties of fluids. In conditions where the rapid EHD convection is induced, the material functions play an essential role in producing the force across the free surface.

Figure 7 shows the jet height at an electrode voltage of 12 kV as a

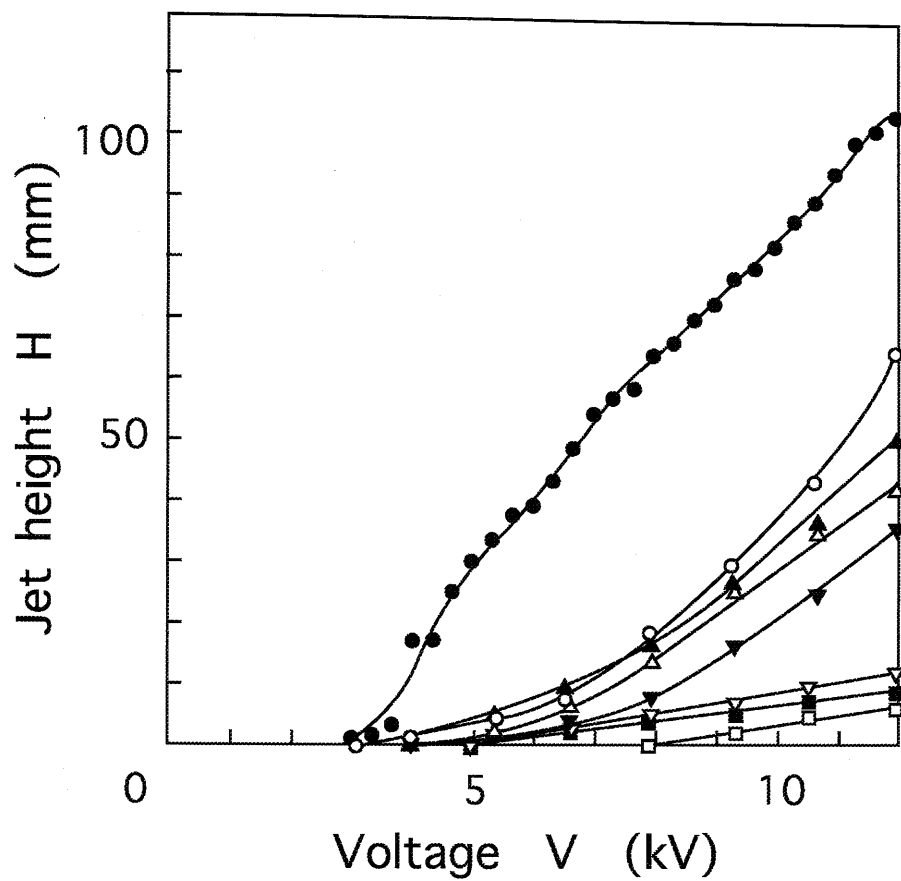


Figure 6 Jet height plotted against the applied voltage for various fluids;  
 (▲) DBA, (○) DBS, (△) DBM, (▽) DOTP, (□) TA,  
 (▼) TMPD, (■) TMPM, (●) FF3.

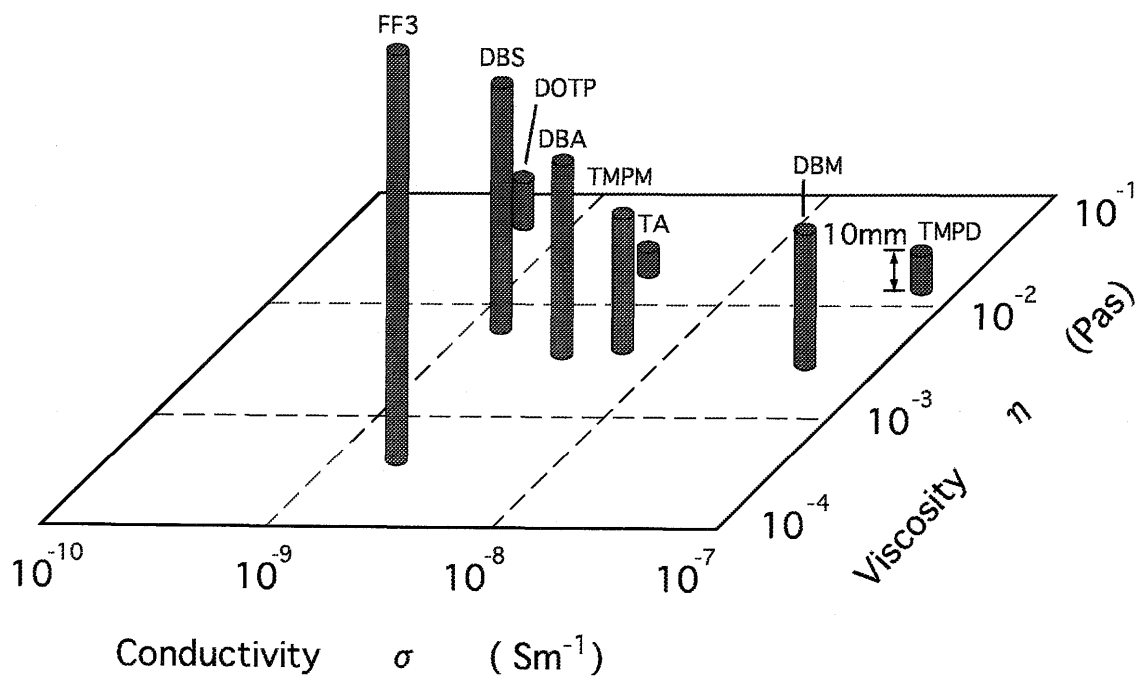


Figure 7 Jet height at 12 kV as a function of viscosity and conductivity for various fluids.

function of viscosity and conductivity for all fluids used in this work. The data were obtained at zero gap distance by the use of 0.2 mm nozzle. With decreasing viscosity and conductivity, the jet height increases as expected from the ER experiments. The ER effect of pure oils in the electrodes with flocked fabrics can be attributed to the disturbance of EHD convective motion with periodical structures by the external shear. Since the interactions or cooperative motion between EHD convection and applied shear require the additional energy dissipation, the viscosity of liquids can be increased due to their combined effects. In EHD inkjet, the vertical force is exerted on the liquid column in the nozzle. The force in inkjet formation process may be comparable to that required to hold the domain structures under static conditions in the electrodes for ER experiments. Similar dependence of inkjet height and ER viscosity on the material functions indicates that both effects are controlled by the same mechanism. Although the detailed experiments are required to quantitatively establish the EHD dynamics, we can reach the very important conclusions that the practical method of providing good inks is the reduction of viscosity and conductivity of medium oil.

In practical application of EHD inkjet device, the designs of oils and nozzle geometry are essential to satisfy many requirements. The critical voltage can be reduced by the nozzle design and the height of inkjet can be increased by the design of material properties. Their combination may be the key technology for fabrication of high performance inkjet.

**Acknowledgment.** This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan, for which the authors are grateful.

## **References**

1. B. Lopez, A. Soucemarianadin, and P. Attane, Break-up of continuous liquid jets; Effect of nozzle geometry, *J. Imaging Sci. Technol.* **43**, 145(1999).

2. H. Fukumoto, J. Aizawa, H. Nakagawa, H. Narumiya, and Y. Ozaki, Printing with ink mist ejected by ultrasonic waves, *J. Imaging. Sci. Technol.* **44**, 398(2000).
3. W. J. Worraker and A. T. Richardson, A nonlinear electrohydrodynamic stability analysis of a thermally stabilized plane layer of dielectric fluid, *J. Fluid Mech.* **109**, 217(1981).
4. M. Suzuki, Propagating transition of electroconvection, *Phys. Rev. A* **31**, 2548(1985).
5. A. Castellanos, Coulomb-driven convection in electrohydrodynamics, *IEEE Trans. Electr. Insul.* **26**, 1201(1991).
6. T. Maekawa, K. Abe, and I. Tanasawa, Onset of natural convection under an electric field, *Int. J. Heat Mass Transfer* **35**, 613(1992).
7. J. P. Gosse, Electric conduction in dielectric liquids, NATO ASI Ser B **193**, 503(1988).
8. S. Yasufuku, T. Umemura, and T. Tanii, Electric conduction phenomena and carrier mobility behavior in dielectric fluids, *IEEE Trans. Electr. Insul.* **EI-14**, 28(1979).
9. M. Haga, T. Maekawa, K. Kuwahara, A. Ohara, K. Kawasaki, T. Harada, S. Yoda, and T. Nakamura, Effect of electric field on Marangoni convection under microgravity, *J. Jpn. Soc. Microgravity* **12**, 19(1995).
10. Y. Otsubo and K. Edamura, Dielectric fluid motors, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 318(1997).
11. Y. Otsubo and K. Edamura, Viscoelasticity of a dielectric fluid in nonuniform electric fields generated by electrodes with flocked fabrics, *Rheol. Acta* **37**, 500(1998).
12. Y. Otsubo and K. Edamura, Electric effect on the rheology of insulating oils in electrodes with flocked fabrics, *Rheol. Acta* **38**, 137(1999).
13. S. Yokota, M. Hirata, Y. Kondoh, K. Suzumori, A. Sadamoto, Y. Otsubo, and K. Edamura, Micromotor using electroconjugate fluid, *J. Robotics Mechatronics* **13**, 140(2001).