

ECF(電界共役流体)技術解説

●ECF技術の詳細

1. ECF技術とは？

1-1) EHD (Electrohydrodynamic) 効果について：

ある種の誘電液体は、電界中において、その導電率と誘電率の不均一性に起因して、液体内部に電氣的な力を生じる。直流電場下では、誘電液体の誘電泳動力より自由電荷に作用するクーロン力が支配的となり、しばしばクーロン力は流体力学的不安定性を引き起こすことがある。

このような、電界下にある誘電液体に対流または2次流れが発生する現象は、電気流体力学 (Electrohydrodynamic, 略してEHD) 効果と呼ばれている。このEHD効果については、残念ながら、現在でもあまり詳細な発生原理解明研究はなされていないようであり、電界下において誘電液体が動く（流動する）現象は、一般的に総じてEHD現象と呼ばれている。

1-2) ECF現象とEHD現象の違いについて：

ECF現象（第1図参照）は、広義的にはEHD現象の一つと考えられる。しかし、これまで知られているEHD現象と比較し、誘電液体の化学構造や、作動条件、流動速度等が大きく相違することから、発生原理が異なると考えられ、これまでのEHD現象と区別する目的で、この特性を示す流体を電界共役流体 (Electro-Conjugate Fluid, 略してECF) とし、この現象をECF現象と呼称した。現在、その発生原理は解明研究中である。

EHD現象はこれまでも単発的に発表されているが、その内容は千差万別であり、その発生機構の何れもが十分には解明されていない。それらの発表事例を調査し、下記3つのECF類似技術としてまとめた。

技術	作動媒体	評価	作動条件	評価	作動度	評価	総合評価
①イオン泳動	鉍油・イオン種	○	5KV・計算値	○	0.5cm/s	XX	X
②EHD対流	シリコン油	○	2KV・宇宙空間	XX	10cm/s	△	X
③EHD液体ジェット	フロン・エチルアルコール混合物	X	25KV・冷却用途	△	67cm/s	◎	△
④ECF技術	ECF（電界共役流体）	◎	5KV・実測値	◎	100cm/s	◎	◎

①イオン泳動現象：溶液中のイオン種が電極へと移動することにより、溶液に流動が発生し、大電流が流れる。イオン種が全て泳動後は、流動は起こらず電流も低下する。(1993 発表)

②EHD対流現象：シリコン油において、電極間に対流が発生する。このときの電圧は2KV/mmであり、宇宙空間実験にてマランゴニ対流発生研究中に観察された。発生原理は詳細には解明されていない。(1995 発表)

③EHD液体ジェット現象：フロンとエチルアルコールの混合液体において、電極間にジェット流が発生する。このときの電圧は25KVである。ジェット流発生原理は、まだ解明されていない。(1988,1994 発表)

④ECF技術：電界共役流体において、電極間に強いジェット流が発生する。その大きさは、上記の③EHD液体ジェット現象とほぼ同様であるが、印加電圧値は5KVであり、電圧値換算では本現象が最も大きな作動度を示す。(1996 発表)

1-3) ECFジェット噴流

多くのECFは、電界下に正極（+）から負極（-）への強いジェット噴流を発生する。ジェット噴流の様子を下記に示した。

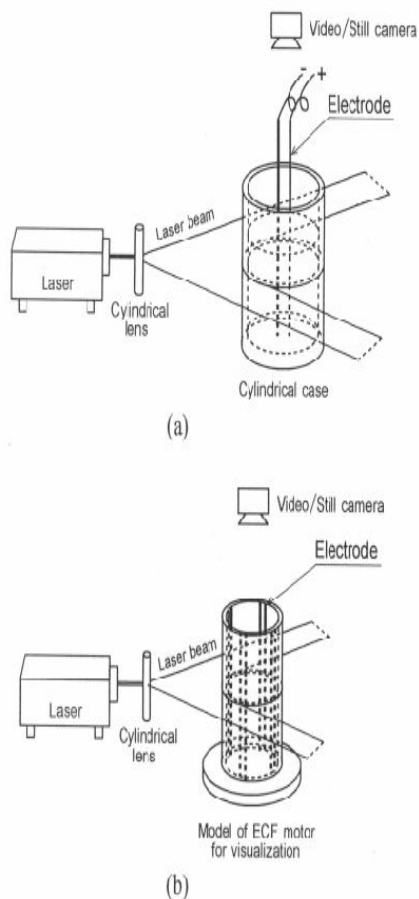


Fig.1 Measurement Equipment

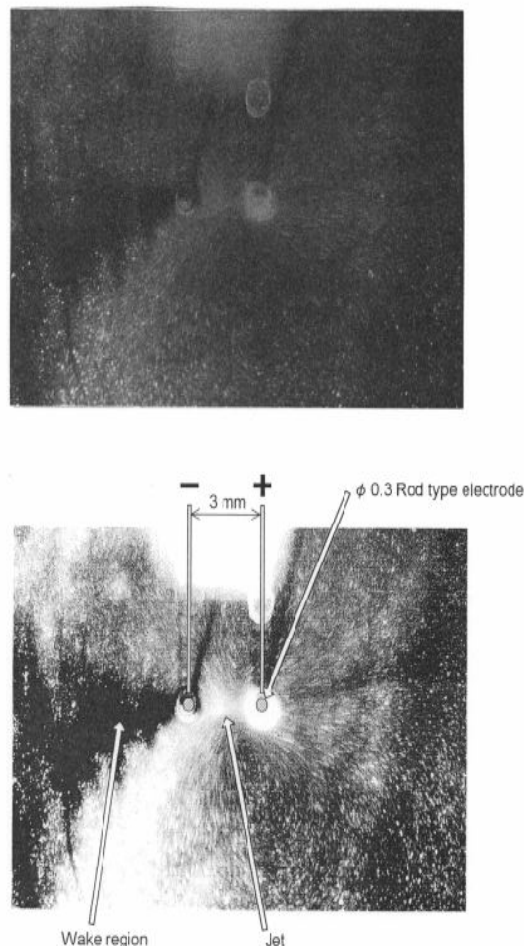


Fig2. ECF Jet Flow

ECFジェット噴流は、プラスチック微粒子をトレーサーとして用いて、赤色レーザーを照射し、可視化観察した。上記 Fig.1 には、観察に用いた装置構成を、Fig.2 には可視化観察により得られたECFジェット噴流の様子を示した。特に、Fig.2 では、ECFジェット噴流の方向が、正極より負極方向へと発生していることが分かる。

また、下記した Fig.3 には、1 個の正極電極に対し、2 個の負極電極を敷設した時に発生する ECF ジェット噴流の様子を示し、Fig.4 には、正負 4 対の電極を円周上に敷設した時に発生する旋回状の ECF ジェット噴流を示した。

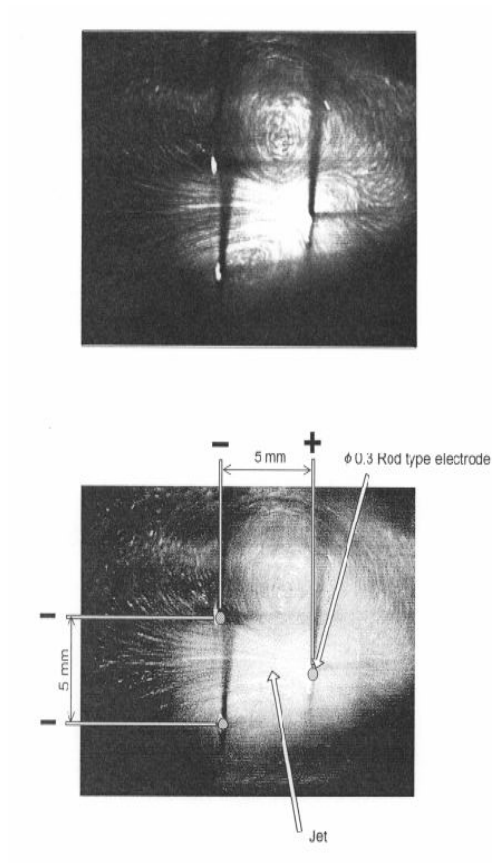


Fig.3 3 electrodes

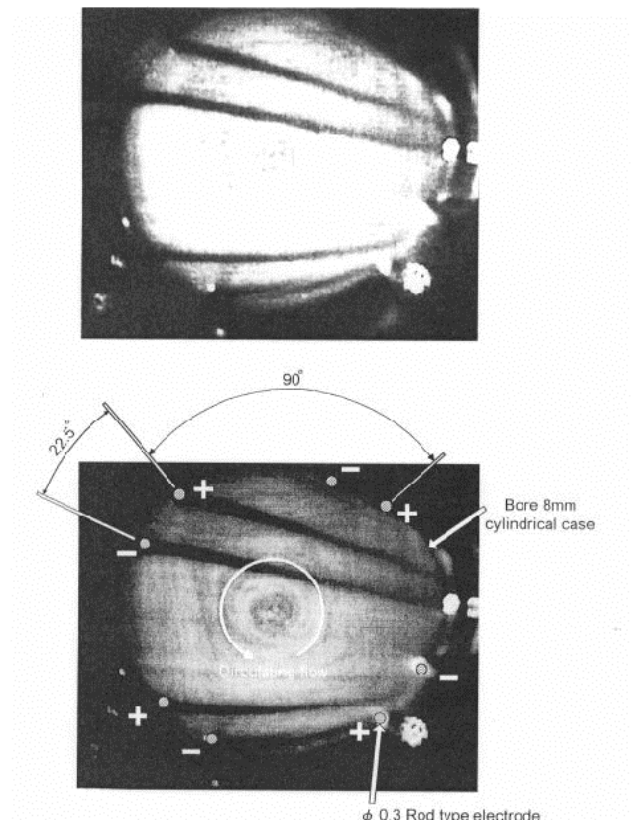


Fig.4 4 pairs electrodes

Fig.3 では、正極から発生したECFジェット噴流が、2個の負極の間を通過していることを示し、Fig.4では、ECFジェット噴流が円周上の4対の電極間を半時計回りに旋回して、循環流動が発生していることが分かる。

1.4) ECFの流体物性

ECF現象の詳細メカニズムは、現在、新技術マネイジメント社・東京工大・千葉大の3者共同開発により解明研究中である。幾つかの流体物性が、このECF現象発生に関与していることを既に解明しているが、この内、2つの物性値である粘度と電気抵抗値の関係を Fig.5 に示した。

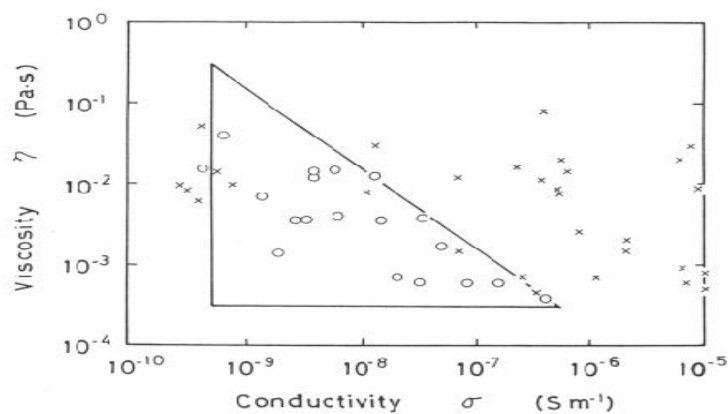


Fig.5 Property of ECF

上記 Fig.5 の縦軸には流体粘度を、横軸には流体の電気抵抗値を示している。三角形の内部に位置する流体が、電界下に E C F ジェット噴流を発生する。また、E C F が混合物であっても、混合物の流体物性がこの三角形内に位置していれば、E C F 特性を有し、電界下に E C F ジェット噴流が発生する。

1-5) E C F の種類

既に、3 者の共同研究により、50 種類以上の E C F 特性を有する単品（単一化学構造式）流体を見出している。また、上記 Fig.5 の三角形内物性値を有するように、三角形内に位置していない流体同士や添加剤を混合して、E C F 特性を有する E C F 組成体を調製することも可能であり、実際に機能する E C F の種類は無数となる。これらを、用途別の要求性能に合致した組成配合に調製して、E C F 応用開発に提供している。

2. E C F モーター

2-1) 駆動原理

下記 Fig.6 に示す 2 種類の駆動原理を研究開発している。下記(a)に示す電極間に発生する E C F ジェット噴流力は強く、これを駆動力や推進力として用いているのが E C F モーターである。いずれも、駆動特性は、印加電圧により制御可能である。

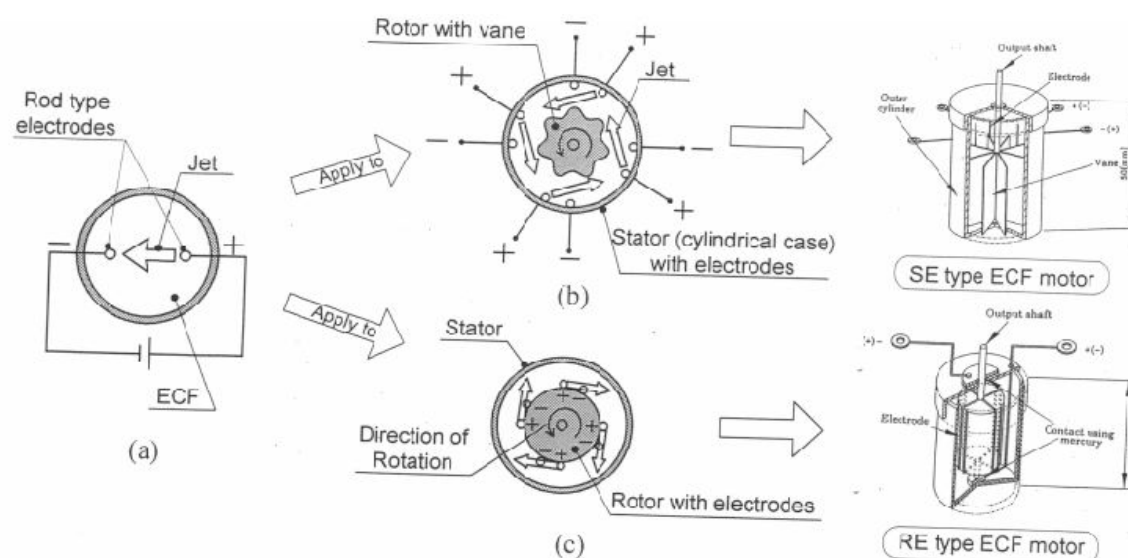


Fig.6 ECF Motor Principle

上記(b)SE type ECF motor は、固定電極間の E C F ジェット噴流を駆動力として用いている。羽根型水車を E C F ジェット噴流中に設置し、水車の回転運動から仕事トルクを得ることができ、S E (Stator Electrode) 型 E C F モーターと呼称されている。(c)RE type ECF motor は、回転ロータ部に電極を敷設して電極間の E C F ジェット噴流を直接ロータの推力とする駆動原理であり、R E (Rotor Electrode) 型 E C F モーターと呼称されている。また、ロータを直線上に配置したリニア駆動型 E C F モーターもある。詳細は下記するが、E C F モーターは部品点数が少なく安価・単純構造であり、故障の少ない高信頼性な高速回転モーター機構が可能である。

2-2) モーター構造

下記 Fig.7-1 左部（プロペラ部品搭載）には試作した 4mmφ S E 型 E C F マイクロモーター、右部（上：回転測定板搭載、下：組立後）には 3mmφ S E 型 E C F マイクロモーターを示している。また、Fig.7-2 には 4mmφ S E 型 E C F マイクロモーターを分解した部品構成を示す。

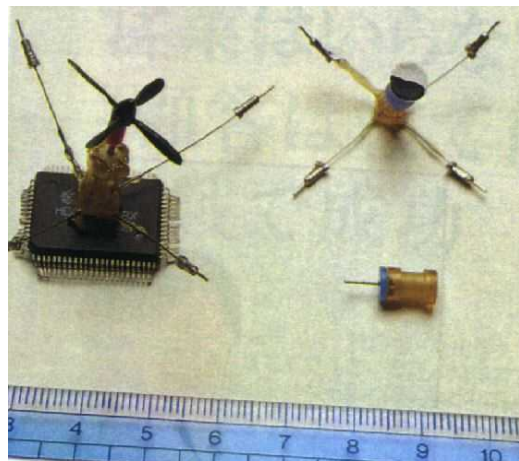


Fig.7-1 Left :4mmφSE ECF Motor
Right:3mmφSE ECF Motor

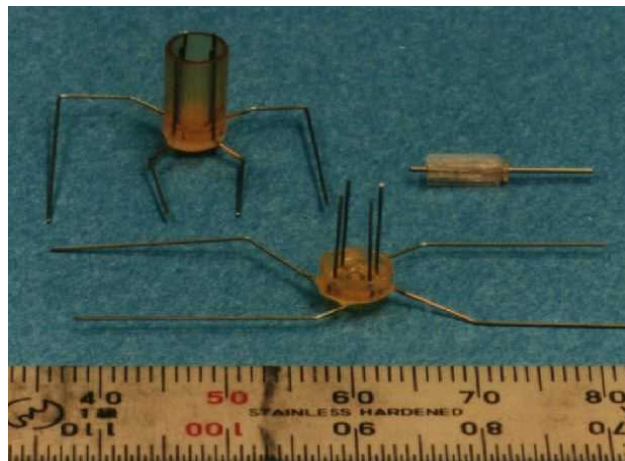


Fig.7-2 Parts of 4mmφSE ECF Motor

単純構造で部品点数は少なく、構成部品の殆どはプラスチックを用いて製造可能なことから安価であり、錆びる心配もない。また、磁力を用いず磁界の影響も受けないことから、耐久性に優れた高信頼性モーターが可能である。さらに、静音でエネルギー効率に優れた特性も有している。

2-3) E C F モーター特性

下記 Fig.8-1 と Fig.8-2 に示す黒点は、実際に試作した S E 型 E C F モーターと R E 型 E C F モーターを示している。横軸にモーター径を、縦軸に得られたパワー密度を示している。モーター径が小さくなり微小化すると、パワー密度が向上していることが分かる。また、一般的に磁界モーターは微小化によりパワー密度は減少することから、同グラフ中に示す点線は、同径の磁界モーターが試作された時の予想パワー密度傾向を示している。

このように、E C F モーター特性は、これまでの磁気反発を利用する磁界モーターとは全く異なり、微小化に伴い、回転数が向上しパワー密度も増加するという正反対の特性を有している。

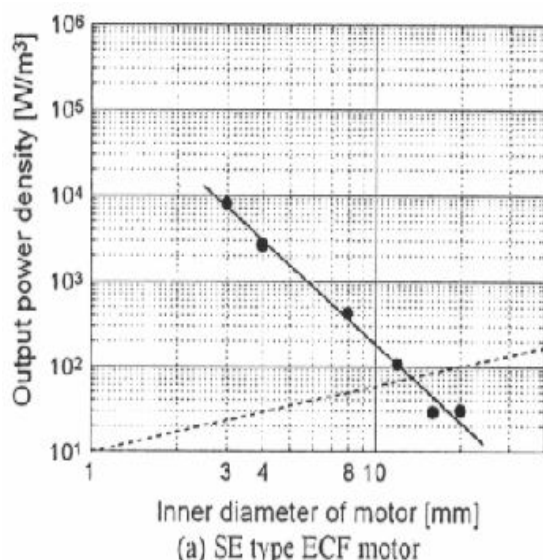
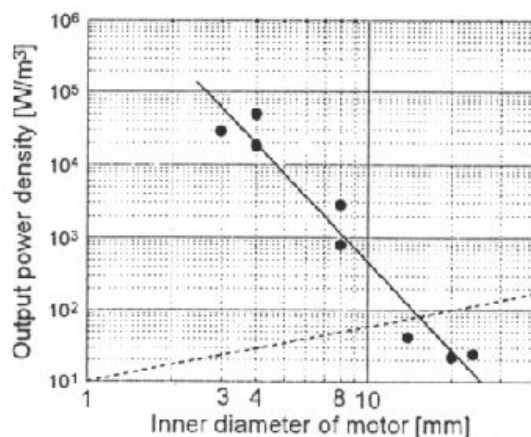


Fig.8-1 SE Motor Power Density



(b) RE type ECF motor
Fig.20 Miniaturization characteristics of ECF motor
(Relation between inner diameter and output power density of ECF motor)

Fig.8-2 RE Motor Power Density

2-4) ECFモーター性能

ECFとしてDBD (Dibutyl Decandioate)を用い、電界として6KV-DCを使用した時のSE型ECFマイクロモーターとRE型ECFマイクロモーターの性能を、下記Fig.9-1~3に示す。

尚、DBDは安価で無臭であることから、開発実験には良く用いられるが、実際の実用化開発時には、使用用途の要求性能に合致した特性を有するECFが選択される。また、不燃性・難燃性の要求や、装置や容器に用いるプラスチック・ゴム材質との相性なども考慮して、ECFは設計・調製される。既に、ある開発用途では、下記に示すパワー密度の数倍の性能を示すECFが調製されており、そのエネルギー効率率は70%以上である。

(Maximum rotational speed, Torque, Output power and Efficiency)						
	SE type			RE type		
Inner diameter [mm]	8	4	3	8	4	3
Maximum rotational speed [rps]	28	54	60	25	93	98
Maximum torque [μ Nm]	8.8	4.2	4	30	16.5	15
Maximum output power [mW]	0.3	0.2	0.24	1.9	1.4	0.8

Fig.9-1 Max.Property under 6KVDC

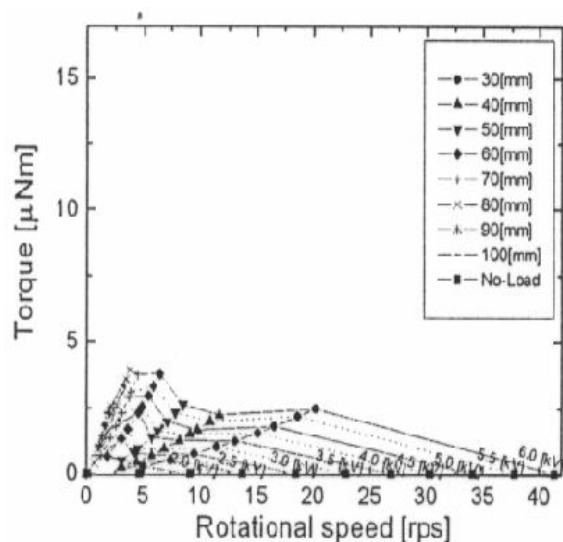


Fig.9-2 SE type ECF Motor

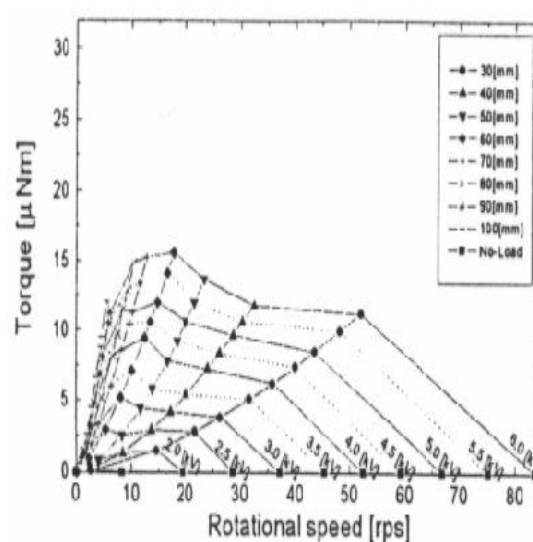


Fig.9-3 RE type ECF Motor

2-5) SE型構造とRE型構造

上記したそれぞれのモーター構造は、それぞれに利点を有している。固定電極より発生するECFジェット噴流の駆動力を用いるSE型構造は、低トルク・高速回転に最適である。回転ロー

タ上の電極より発生するECFジェット噴流を推進力として用いるRE型構造は、負荷に強く大きなトルクを発生する。また、回転ロータの形状自由度も大きく、厚さ0.2mmの円盤型回転ロータや、0.5mmφの円筒型回転ロータも試作している。

2-6) これからの開発予定

厚さ2mm以下の薄型マイクロモーターを目指して、RE型構造を用いてECFマイクロモーターを開発中である。既に厚さ1.0mmの回転ロータを有する厚さ4.5mmのRE型ECFマイクロモーターを試作している。そのモーターを下記Fig.10-1に、回転ロータをFig.10-2に示す。

ボタンと類似する形状を示す下記RE型ECFマイクロモーターは、DP(Disk Plate)型ECFマイクロモーターと呼ばれている。このプラスチック製回転ロータ上の電極は、メッキ工法により製造加工されている。

また、現在開発中の厚さ0.2mmの回転ロータの材質には両面フィルムプリント基板を用いており、電極はエッチング工法により製造加工される。また、本構造によれば、回転ロータの積層化による更なる高トルク発生や高速駆動が可能となり、磁界モーターを遥かに凌ぐ回転性能を有するECFマイクロモーターが期待できる。



Fig.10-1 DP-RE Motor



Fig.10-2 Rotor of DP-RE type ECF Motor

3. ECF流動制御システム

静止しているECFに電界によりジェット噴流を発生させ、その推力や反発力を利用しようとする応用分野とは逆に、外部力により流動しているECF中に、電界によってジェット噴流を発生させ、本来の流動方向に対して抗力を発生させることができる。この抗力は、流体の見かけの粘度増加という結果となって現れる。即ち、電界によって流体のレオロジー特性が変化する電気レオロジー（ER）効果と同様の結果が得られることとなる。この場合、用いているのは、均一で透明な誘電液体（ECF）であり、電界に感応して鎖状構造を形成する粒子の混合や、高次構

造変化を示す液晶分子の添加もない。

即ち、既流動中に新たにECFジェット噴流を発生させ、抗力とすることにより、既流動流量や流圧を回路内で制御することができる。ECFジェット噴流によって、既流動を制御するバルブ原理機構が可能となり、従来にない全く新しい、安価で故障の少ない単純構造の流動制御システムが期待できる。

3-1) ECF流動制御システムの特徴

粒子の混合や、液晶分子を用いず、電界によって均一流体の制御が可能となれば、安価であるばかりか、ポンプ等の損傷や粒子沈降がなく、故障も少なく、安定性に優れた高信頼性の流体機械の開発が可能となる。また、現在の油圧作動油をECF化することにより、現行の油圧制御システムをそのままに、下記する流体制御バルブを組み込むことも可能である。このことは、現在の油圧システムの運転経験や装置設備を無駄にすることなく、下記する制御バルブの追加により、高機能化によるグレードアップが期待できる利便性も有している。

3-2) ECF流体制御のメカニズム

①油圧作動油（ECF作動油）：

用いる油圧作動油は、市販の作動油をECF化調製するか、ECF特性を有しているものを選択して使用する。下記の例には、油圧作動油として一般的な出光スーパーハイドロ32を用いている。

②電極加工：

Fig.11-1～2に示すように、対向する2枚の平板電極を用いる。この内、少なくとも1枚の電極板の作動油接触面は、植毛処理を施してある。この植毛処理には、長さ1mm・太さ3デニールのレーヨン繊維を用いており、植毛密度は7000～8200本/cm²である。ECF作動油は、この電極間の間隙を流れる。尚、この植毛処理は、ECF作動油のER効果を著しく高める効果がある。

③電極間のECF作動油の挙動：

電極間に直流電圧を印加すると、Fig.11-1に示すように、電極間に挟まれたECF作動油は、電圧にほぼ比例した循環流を発生する。この循環流は、上記のECFジェット噴流と同様のものと考えている。

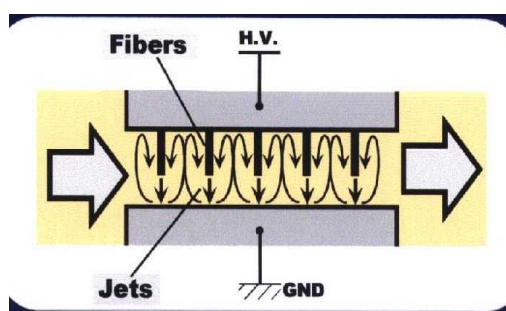


Fig.11-1: Jet Flow between electrodes

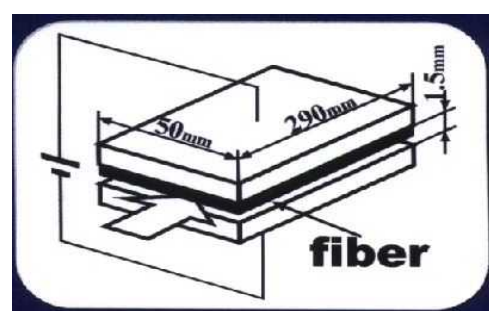


Fig.11-2: ECF Valve system

3-3) ECF油圧回路

上記した Fig.11-2 に示す 2 枚の金属板で電極対を製作し、2 ポートバルブとする。実際の開発で用いている電極板の大きさは、幅 50mm、長さ 290mm、電極間隔は 1.5mm であり、電極間を流れる ECF 作動油の圧力、流量が、電圧印加により制御される。上方電極板の ECF 作動油接触面には植毛処理を施し、ECF バルブとして油圧回路中に敷設した例を、下記 Fig.12-1 に示す。

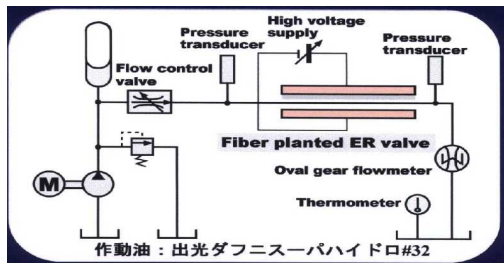


Fig.12-1: Total System

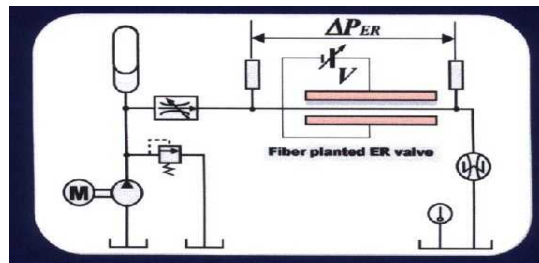


Fig.12-2: Valve Property Measurement

3-4) ECFバルブの特性

ECF バルブ特性は、上記 Fig.12-2 に示した ECF バルブ差圧 (ΔP) の測定により行った。下記 Fig.13 に、ECF バルブに電圧を印加した時の差圧の増加を示した。印加電圧にほぼ比例して、差圧が増加している。また、Fig.14 には、印加電圧を一定にした時の差圧の増加と、ECF 作動油の電極間通過流量の関係を示す。電極間通過流量に対して、ほぼ一定した差圧増加が得られている。

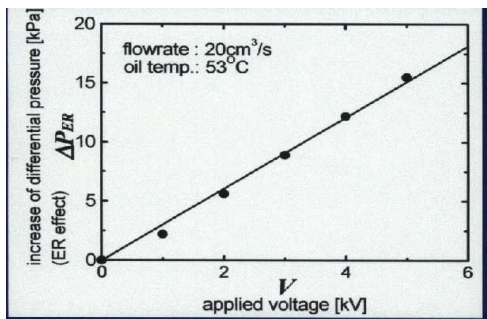


Fig.13: Voltage control

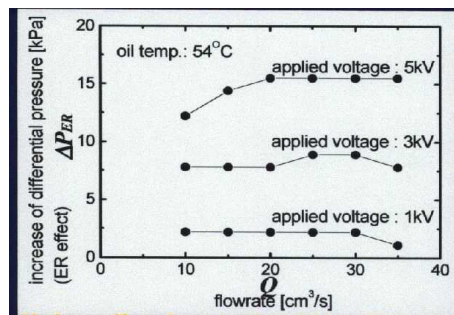


Fig.14: Flowrate control

また、下記 Fig.15 には ECF 作動油温度と差圧との関係を、Fig.16 には植毛 ER バルブに、一定電圧を印加し続けた場合の、差圧の時間変化を示す。油温上昇により得られる差圧は若干低下はするが、経時的に一定値を示し、ECF バルブ効果が安定していることが分かる。

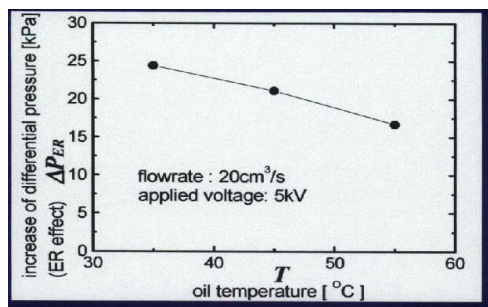


Fig.15: Temperature control

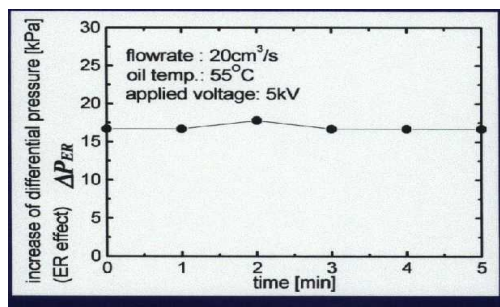


Fig.16: Stability

3-5) これからの開発予定

上記した静特性・動特性の検討や、バルブ電極間のECF作動油挙動を可視化して、詳細な植毛ECFバルブの流動制御メカニズム開発を通して、さらにパワフルでレスポンスに優れる油圧制御機構への応用を目指す。

4. ECF技術の潜在可能性

1995年に、千葉大・大坪教授、東京工大・横田教授、新技術マネジメント社間の3者共同研究にて開発着手されたECF技術は、未だ詳細な作動原理を解明中の基礎技術である。しかし、電界により液体が動くという一見信じ難い現象は、産業界の新技术シーズとして、幅広い応用分野での開発が期待されている。既に幾つかの産業応用分野では、ECF技術は基礎開発から製品開発段階へと進展している。

ここでは、その一部であるモーターや流動制御への応用を説明したが、この他に、冷却冷媒をECF化し発熱部位を直接冷却可能なECF冷却システムや、インクをECF化しECFインクが電極ノズルより噴出するECFインクジェットプリンタ機構等が、既に開発中である。

また、数十件の国内特許・海外特許は出願済みであり、既に6件の米国特許を取得している。ECF技術の開発国は日本のみならず米国、ECに跨っており、21世紀の新技术として産業応用される日は近い。