

均一系の機能性流体を利用したマイクロ  
流体システムの開発

07555062

平成7年度～平成8年度 科学研究費補助金  
(基盤研究(A)(2)) 研究成果報告書

平成9年3月

研究代表者 鳴 海 敬 倫  
(新潟大学工学部助教授)

はしがき

この小冊子は、平成7年度と平成8年度にわたって交付された文部省科学研究補助金（基盤研究（（A）（2）））によってなされた“均一系の機能性流体を利用したマイクロ流体システムの開発”の研究報告書である。

液晶やER流体に代表される機能性流体は工業上の応用性の高さから最近注目を集めている。しかし、これらの流体の本格的な検討が開始されてからの日は浅く、現在は通常のスケールの流動場の研究が進められている。一方、国家的プロジェクトであるマイクロマシンの開発やそれに関連するマイクロトライボロジーの分野では微小構造内の流れが問題となる。マシン全体の微小化を考慮すれば余分な機械的駆動部は少ない方が望ましい。この点から考えれば、流体の動きを機械的な力ではなく電場などの印加によって制御するシステムが理想的と言える。液晶は電場の印加によって分子の配向状態が変化し、粘度が変わることが知られている。またそれだけでなく、液晶ではある種の条件下で自励的な流動が生じる。このような流動を用いれば機械的な駆動部の少ないマイクロ流体システムを構築する事が可能と考えられる。しかし、マイクロ構造内の流れの制御や流動システムに関する研究はこれまでほとんどなされていない。

本研究では、この印加電圧により発生する液晶の配向状態や対流さらには動的散乱状態が発生する現象を利用し、マイクロマシンへの応用を考えた次のような新しいマイクロ流体システムの開発を目的とした。すなわち、マイクロ構造内の流動をおもに液晶の配向や動的散乱状態を利用して制御するマイクロダンパーおよびマイクロ潤滑システムの開発を目指した。また、電場間に発生する液晶の対流を利用した方向性のある流れを生じさせる流動システムの試作ならびにそれを利用した流体駆動システムの開発を試みた。

具体的には、まず、液晶の電気粘性効果を用いたマイクロダンパーおよびマイクロ流体潤滑システムの開発に関して、直流電場下および交流電場下における電界強度および交流の周波数などの電気粘性効果への影響を各種液晶について実験的に調べた。その結果から、最も高い電気粘性効果が得られる条件、時間安定性について検討を加えた。また、時間的応答、すきまの影響等についても検討を加え、液晶のダンパーおよび流体潤滑の制御への適用性を調べた。

また、電場間に発生する対流を利用して方向性のある流れを生じさせる流動システムの開発として、流路の上流と下流で流れ方向に電場をかけ、一方向の流れを発生させる実験も行い、液晶を用いた静電マイクロポンプなどへの発展性を検討した。

## 研究組織

研究代表者： 鳴海 敬倫 (新潟大学工学部助教授)  
研究分担者： 長谷川 富市 (新潟大学工学部教授)  
研究分担者： 坂井 樹弘 (英弘精機(株)分析部門 技師)  
研究分担者： 方 義 (新潟大学大学院自然科学研究科助手,  
平成7年度のみ)

## 研究経費

平成7年度	7,500千円
平成8年度	1,500千円
計	9,000千円

## 研究発表

1. 前田浩芳・鳴海敬倫・長谷川富市, 液晶の電気的不安定性現象による微小二次元流路内の流動特性の制御, 日本機械学会第73期通常総会講演会講演論文集, No. 96-1, Vol. 3, pp. 225-226, (1996. 4)
2. 鳴海敬倫・前田浩芳・長谷川富市・坂井樹弘, 液晶の電気的不安定性現象を伴う微小すきま内の流動, 第8回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, No. 96-252, pp. 367-368, (1996. 5)
3. 前田浩芳・鳴海敬倫・長谷川富市・坂井樹弘, 微小すきまにおける液晶のER効果, 日本機械学会第74期全国大会講演論文集, No. 96-15, Vol. 3, pp. 111-112, (1996. 9)
4. 前田浩芳・鳴海敬倫・長谷川富市・坂井樹弘・反町和則, 狭い隙間での液晶のER特性, 第44回レオロジー討論会講演要旨集, pp. 215-218, (1996. 10)

## 研究報告

マイクロマシンへの応用を目指し、液晶の電圧印加による配向状態や対流の発生を利用したマイクロ流体システムの開発を試みた本研究で得られた成果は、各々以下の様に要約される。

1. まず、液晶の電気粘性効果を用いたマイクロダンパーおよびマイクロ流体潤滑システムの開発に関しては、直流電場下および交流電場下における電界強度および交流の周波数などの電気粘性効果への影響を実験的に調べた。その結果、直流電場印加時が最も高い電気粘性効果が得られ有効であるが、時間的に不安定であることがわかった。この点も含め、液晶では交流電場印加時が安定した配向状態と電気粘性効果が得られ、ダンパーおよび流体潤滑の制御にも適することが明らかになった。また、時間的応答も検討した結果、電気粘性効果の応答と光学的応答は同程度であり、実用に耐え得ることが確認された。ただし、10mm以下のすきまでは壁面の影響が現れ、それ以上のすきまの場合よりも電気粘性効果が減少してしまうことが明らかとなった。なお、これらの実験で各種液晶について電場印加時の特性を調べたところ、誘電異方性が正の液晶が本研究の目的には適することがわかった。
2. また、電場間に発生する対流を利用して方向性のある流れを生じさせる流動システムの開発として、流路の上流と下流で流れ方向に電場をかけ、一方向の流れを発生させる実験も行った。電極間の対流の十分な制御には至らなかったが、櫛歯状の電極を対向させた流路において1方向の流れが発生することが確認された。これは液晶を用いた静電マイクロポンプの作成が可能であることを示しており、液晶の流動を利用したアクチュエータへ発展できると考えられる。

これらの点から液晶はマイクロ流体システムへの応用性が高いことが明らかになった。今後さらに静電場での対流を利用した流動システムの開発を継続して行う予定である

以下に、第1部として“マイクロダンパーおよびマイクロ流体潤滑システムの開発に関する基本的検討”に関する研究結果を、第2部として“方向性のある流れを生じさせる流動システムの開発に関する基本的検討”に関する研究過程を報告する。

# 第1部 マイクロダンパーおよびマイクロ流体潤滑システムの開発に関する 基本的検討

## 第1章 緒論

### 1.1 緒言

現在、様々な分野でより付加価値の高い材料の開発が行われている。これらは近年スマート材料として注目されており<sup>(1)</sup>、神山らは“生物系にみられるような外部環境の変化（刺激）によって、それを知覚し、素早く自己応答する能力を持つ材料”とスマート材料を定義している。代表的なスマート材料としては、圧電材料、形状記憶合金、機能性流体などが挙げられる。

機能性流体の中のひとつである電気粘性流体(Electrorheological Fluid;ER 流体)は、電場印加時に流動抵抗が変化することを利用して見かけの粘度を可逆的に変化させることのできる流体の総称である。ER 流体は、電気的信号で直接機械的応答を発生させることができ、応答速度も速く粘度の変化する範囲が広いことから、ダンパ、クラッチなどの機械要素への応用が検討されている。またこれらの ER 流体を利用したデバイスを現在のデバイスに置き換えることにより、複雑な可変機構を用いなくとも機械要素のアクティブな制御が可能になるため、制御システムへの応用など広い分野での研究が行われている。しかし現在広く利用されている分散系 ER 流体は、絶縁体であるシリコンオイルなどに、数マイクロから数十マイクロメートルの粒子を分散させたものが主流であるため分散媒との間の比重差による粒子の沈降、また熱的な不安定性のため運転中の ER 効果の変動が生じやすく応用上の問題となっている。また粒子を利用しているため微小なすきまを持つ流路や、ポンプ等を有する循環系、また将来の発展が期待されるマイクロマシン等での微小構造内の流れへの応用は困難である。そこで現在では、流体のみで同様な ER 効果を起こす、いわゆる均一系流体の開発が望まれている。本研究では均一系 ER 流体の一つとして液晶を用い、特に狭いすきまでの ER 効果の検討を行った。

### 1.2 従来の研究

流体が電場下で粘度を変化させる現象は、一般に電気粘性効果と呼ばれており、アセトンや水などの有極性の均一系液体に対し、電圧を印加することによって見かけの粘度が増加する現象として知られていた。これらの現象については後年、本田、笹田らによって系統的に研究されている<sup>(2)</sup>。しかし粘度増加の割合はそれほど大きくなかったため、実際の機能性材料として大きく注目されることはなかった。機能性材料として ER 効果が注目されるようになったのは、1947年に Winslow によるコロイド溶液に対する電気粘性効果（ER 効果）に関する報告がなされてからである。この Winslow によって観測された電気粘性効果は、従来の均一系液体の粘度増加よりもかなり大きな粘度増加を示したため、世界各国で ER 流体の研究が活発になり応用的な検討も開始された。一般に ER 流体を材料で分類すると、分散系 ER 流体と均一系 ER 流体の2種類に大別される。分散系 ER 流体は、絶縁性の油、たとえばシリコンオイルや鉱物油の中に、イオン交換樹脂のような誘電極を起こす微粒子を分散させたものである。一方、均一系 ER 流体は流体中に分散粒子を必要としないものである。図 1.1 に ER 流体の分類を示す。

現在、ER 効果の発生機構の解明、ER 流体の開発、ダンパ、クラッチの制御に ER 流体を用い

て制御する応用面での研究が行われている<sup>(4)</sup>。これらの ER 効果の発生機構、及び応用例を簡単に説明する。

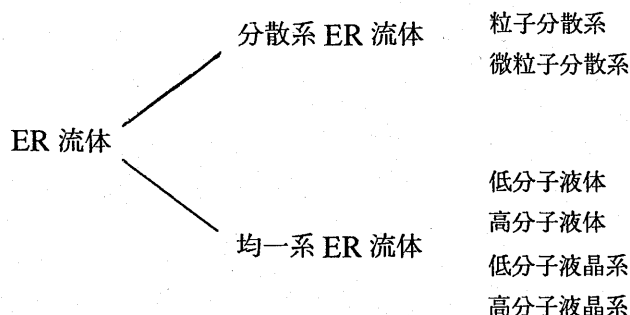


図 1.1 ER 流体の分類

### 1.2.1 分散系 ER 流体

#### 1. 分散系 ER 流体の ER 効果の発生機構

分散系 ER 流体の ER 効果の発生機構に関しては多くの研究例がある。ER 効果の発生機構を簡単にまとめると次のようになる<sup>(4)</sup>。電場を印加していないときは ER 流体は図 1.2(a)の様に通常の粒子分散系の流体と同様に流動する。電場を印加すると ER 流体中の分散相粒子が電気分極を起こす。この電気分極した粒子は静電的な相互作用によってお互いに引きつけあいクラスターを形成する。せん断が加わっていないときには図 1.2(b)に示すように電極間に分散相粒子が鎖状構造を形成する。また流動時にはこの鎖が切れることによりせん断応力が増加すると考えられている。このように分散系 ER 流体は粒子の相互作用によって ER 効果が発生する為、粒子の分散性や沈降性、熱的安定性等によって大きく ER 効果が増減し、実際の機器へ応用する際の大きな妨げになっている。また分散系 ER 流体の構造上粒子を含むため、ポンプなどの循環系への応用やマイクロ構造の流路への応用は困難である。また ER 効果が発生させるためには高電圧を印加しなくてはならないため、電気的な安全性の上からでも問題になっている。図 1.3 に分散系 ER 流体の粘度増加の概念図を示す。ここで $\tau_0$ は ER 効果によって発生する降伏応力である。電圧を印加することによって電圧を印加しないときの基底粘度 $\eta$ は変化せず、ER 効果によって発生する降伏応力 $\tau_0$ が増加するため、せん断応力 $\tau$ が増加するとされている。このように流体が見かけ上降伏をするため、静止状態から降伏応力 $\tau_0$ までの範囲では固体状態であり流動性が失われることになる。

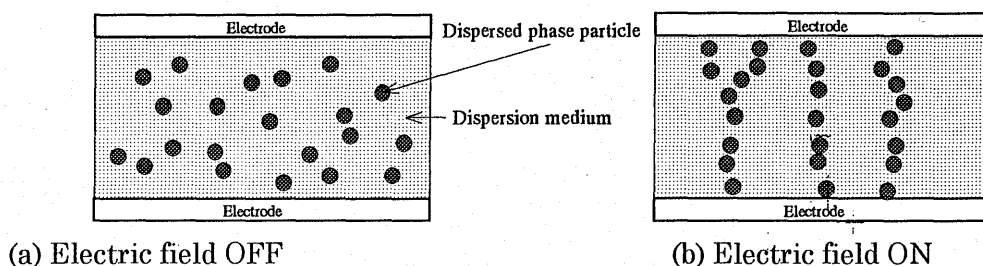


図 1.2 分散系 ER 流体の ER 効果の発生機構（流れが無い場合）

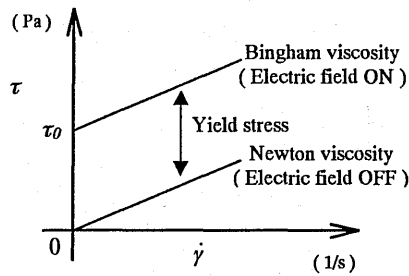


図 1.3 分散系 ER 流体のひずみ速度とせん断応力の関係

## 2. 分散系 ER 流体の開発例

ER 効果を示す粒子は数多く提案されており、様々な材料が提案されている。分散粒子を分類すると吸着水形、電解質形、高分子微粒子形、導電性粒子形、炭素質系などに分けられる<sup>(4)</sup>。これらの粒子の粒子径は数 $\mu\text{m}$  から数十 $\mu\text{m}$  程度であり、沈降安定性や温度に対する安定性にも不安な点が多い。また粒子径を小さくすると粒子の凝集が起こったり、ER 効果自体が小さくなるため、これ以上粒子を小さくすること困難である。しかし最近では、沈降安定性、分散安定性に優れたナノメートルオーダーの微粒子を用いた超微粒子分散系 ER 流体が開発されており<sup>(5)</sup>、ER 流体の実用化に向けて期待されている。

## 3. 分散系 ER 流体の応用研究例

分散系 ER 流体の応用例として、可変減衰ダンパー、制震（免震）装置、動力伝達機構、圧力・流量調整弁、軸受けなどがあげられる。これらは基本的にクラッチ、ダンパーの応用と考えられる<sup>(6)</sup>。中野らは、2次元流路形の ER ダンパーを作成し、ピストン速度などで印加電圧をフィードバック制御することにより、ER 流体の粘弾性挙動を制御することが可能であることを示した<sup>(7)</sup>。また森下らはターボ機器等の軸受け部に電極を取り付けたスクイーズフィルムダンパーを制作し、電圧を変化させることによって軸受けの固有振動数を変化させ、回転軸の軸の振動を抑制できることを示した<sup>(8)</sup>。しかし分散系 ER 流体を用いる装置では、分散粒子の分散安定性や高電圧を印加しなければならないなどといった点で問題が多く、実用化された例は極めて少ない<sup>(9)</sup>。しかしセラミックスなどの脆く欠けやすい材料を精密に切断できる、ER 流体で機能するカッティングマシンが開発された例もあり<sup>(9)</sup>実際の機械への応用が進みつつある。

### 1.2.2 均一系 ER 流体

低分子液体における ER 効果は分散系 ER 流体より以前にアセトン、水等の有極性液体に電圧を印加すると、最大 2 倍程度の粘度が増加する現象として知られていた。後年笹田らによって詳細に検討されている<sup>(10)</sup>。低分子液体の ER 効果の発生機構は流体中のイオンがせん断流動場に対して電極方向（流動場と直角方向）に移動（電気泳動）する事によって対流が発生し、その結果流れの流動抵抗が増加する為に起こると考えられている。同様に高分子液体での ER 効果が観測されているが、系統的な研究例が少なく、ER 効果の発生機構も不明な点が多い。均一系 ER 流体の中でもっとも期待されているのが液晶系の ER 流体である。そこで液晶系の ER 効果について紹介する。

#### 1. 液晶系 ER 流体

液晶系 ER 流体の粘度増加の機構は、誘電異方性が負の場合では液晶分子の対流によって流動抵抗が増加し見かけの粘度が変化することが笹田らによって明らかにされている<sup>(2)</sup>。また誘電異方性

が正の場合では、ミエソヴィッツの粘度と分子配向によって説明される例が多い。ミエソヴィッツの粘度と分子配向についての詳しい説明は 3 章で行うので省略するが、簡単に説明すると、液晶分子の向きによっては流れを妨げる力が働き、この結果、見かけの粘度が増加するとされている<sup>(10)(11)(12)</sup>。しかし液晶の ER 効果は、10 倍程度の粘度増加にとどまるため、分散系 ER 流体よりも粘度増加率は小さい。また液晶自体が高価なため、応用は小さなものに限られている。液晶系の粘度増加の様子は図 1.4 に示すようにあたかもニュートン粘性が増加したように変化するため、分散系 ER 流体のような降伏応力は観測されていない。

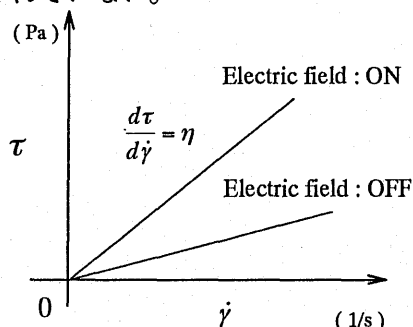


図 1.4 液晶系の ER 流体の粘度増加

## 2. 液晶系 ER 流体の開発例

液晶系の ER 流体はそのほとんどが液晶ディスプレイ用の液晶を用いて実験されている<sup>(11)(12)</sup>。しかし液晶ディスプレイ用の液晶は非常に純度が高く大量生産が困難であるため、価格も非常に高価であり実際の機器へ応用する際には非常に高額な資金を必要とする。また分散系 ER 流体のように、分子構造自体を変化させ ER 効果を大きくしようとする研究は報告されていない。しかし井上らは複数の液晶基を柔軟性のある高分子鎖に結合する事によって電場印加時の液晶分子の滑りを抑制する高分子液晶型の ER 流体を開発し、粒子分散系と同程度の粘度増加率を示すことを報告している。<sup>(13)</sup>

## 3. 液晶系 ER 流体の応用例

均一系 ER 流体の応用例は分散系よりも多くはない。低分子液晶の例として森下らの可変減衰型ダンパの研究例がある<sup>(14)</sup>。また森下らによって液晶を潤滑剤として用いることにより、電圧印加によって潤滑状態を変化させることができることが報告されている<sup>(15)</sup>。また古荘らによってロボットアームに高分子液晶を用いたダンパーを取り付けることによって、印加電圧を制御する事によってロボットアームの高精度な位置決めが可能であることが報告されている<sup>(16)</sup>。

### 1.3 本研究の目的

現在用いられているダンパーやクラッチなどのアクティブ制御には、機械要素だけではなく油圧や空気圧、モーターといった装置によって外部から制御しなければならない。しかし ER 流体は、電気信号によって直接機械的応答を発生させることができるため、複雑な油圧や空気圧システムを利用するアクティブ制御法よりも、簡単で安価なシステムを構成することができる。このため今後ますます ER 流体の応用分野が広がっていくと思われる。しかし現在広く用いられている分散系 ER 流体は、数 $\mu\text{m}$  から数十 $\mu\text{m}$  といった粒子を分散させたものであるため、安定性に欠けることは前節で述べた。また可動部を持つシステムの場合、粒子の破壊や粒子による装置の摩耗等の影響を考慮

して設計しなければならないなど問題点が多い。そこで均一系 ER 流体に対する期待が高まっている。均一系であれば微小構造内での適用も可能となるため、マイクロマシン等での高度な制御が行えるようになるため、更なる高機能化が可能であると考えられている。しかし実際に微小構造内で均一系 ER 流体を用いて ER 効果を評価した例は極めて少ない。また均一系 ER 流体として用いられる液晶についても ER 効果の発生機構等に不明な点が多く残されているが、ER 効果の発生機構について検討された例は多くない。そこで本研究では、均一系 ER 流体の一つである液晶を用い、数十ミクロンオーダーの微小なすきまを持つ電極間における ER 効果の有効性の検討、および微小すきままでの液晶の ER 効果の発生機構を明らかにすることを目的として各種の実験、及び偏光顕微鏡観察を行い検討した。

#### 1.4 第1部の概要

第1部は6章からなり、その概略は以下の通りである。

第1章「緒論」では、本研究の背景と目的を述べ、従来の研究について説明する。また本論文の概要と使用記号表を付記する。

第2章「供試流体」では、液晶に関する概説を行い、本研究と関連するものに関して解説する。また本研究で用いた試料について説明する。

第3章「実験装置」では、本研究で用いた実験装置である平行円板型回転粘度計及び平行平板型2次元流路について説明する。また本研究で用いる見かけのひずみ速度及び見かけの粘度の導出法を示す。

第4章「実験結果」において、平行円板型回転粘度計を用いて測定した結果を示す。また平行平板型2次元流路で測定された結果及び偏光顕微鏡観察の結果を示し、検討を行う。

第5章「考察」において4章で得られた結果をもとに液晶の ER 効果の発生機構、電圧印加時の応答性、すきまの影響更に本研究の応用性について考察を行う。

第6章「結論」では、本研究によって明らかにされたことを総括して述べる。

## 1.5 使用記号

$\tau$	せん断応力	(Pa)
$\tau_0$	分散系 ER 流体における降伏応力	(Pa)
$\dot{\gamma}$	ひずみ速度	(1/s)
$\eta$	粘度	(Pa·s)
$n_{//}$	試料に平行な屈折率	(-)
$n_{\perp}$	試料の直角方向の屈折率	(-)
$\Delta n$	複屈折率	(-)
$\epsilon_{//}$	試料に平行な誘電率	(F/N)
$\epsilon_{\perp}$	試料に垂直な誘電率	(F/N)
$\Delta\epsilon$	誘電率異方性	(F/N)
$f_e$	液晶の電場によるエネルギー密度	(FV <sup>2</sup> /Nm <sup>2</sup> )
$E$	電場	(V/mm)
$\eta_1, \eta_2, \eta_3$	Miesowicz の粘度	(Pa·s)
$V_w, V_c$	しきい値電圧	(V)
$f_c$	しきい値周波数、遮断周波数値周波数	(Hz)
$\rho$	比抵抗	( $\Omega$ )
$r, R$	円板半径	(mm)
$\omega$	円板の角速度	(rad/s)
$h$	円板間の距離	(mm)
$\eta$	見かけの粘度	(Pa·s)
$\tau$	せん断応力	(Pa)
$\tau_R$	円板外周でのせん断応力	(Pa)
$\dot{\gamma}_R$	円板外周でのひずみ速度	(1/s)
$M$	粘度計で測定される軸トルク	(N·m)
$\tau_{R,NEW}$	円板外周部での見かけのせん断応力 (Pa)	
$\eta_{NEW}$	見かけの粘度	(Pa·s)
$h$	平行平板型 2 次元流路のすきま	(mm)
$b$	平行平板型 2 次元流路の幅	(mm)
$l$	平行平板型 2 次元流路の長さ	(mm)
$p$	全圧力損失	(Pa)
$y$	平板からの距離	(mm)
$V_a$	電極での平均流速	(m/s)
$Q$	流量	(m <sup>3</sup> /s)
$\dot{\gamma}_w$	壁面ひずみ速度	(1/s)
$\eta_0$	電圧を印加しないときの粘度	(Pa·s)
$V_a$	平均流速	(m/s)
$V_{al}$	配向時の平均流速	(m/s)
$V_m$	流速の平均値	(m/s)
$m$	物体の質量	(g)
$v$	物体の移動速度	(m/s)
$t$	時間	(s)
$f_v$	粘性力による力	(N)
$F$	駆動力	(N)

## 第2章 供試流体

### 2.1 液晶概説

本研究では、供試流体としてネマティック液晶を用いた。ネマティック液晶は分子構造が簡単で、液晶ディスプレイ等に応用される比較的入手しやすい液晶である。またネマティック液晶は研究に用いられることが多いため、特性が比較的明らかになっている。実験には後に説明する誘電異方性の影響を検討するため、MBBA [*N*-(4-methoxybenzylidene)-4'-n-butylaniline]及び数種類の液晶の混合物 LC を用いた。MBBA は誘電異方性が負、混合液晶は誘電異方性が正の液晶である。以下に簡単に液晶の特徴及び本研究で用いた試料の特性を示す。

#### 2.1.1 液晶の分類<sup>(17)</sup>

液晶相とは、ある物質の固体結晶と等方性液体との中間の性質を示す状態を指す。液晶は通常の液体と同様の流動性を示す一方で、複屈折性等の結晶特有の性質を示す。通常、液晶性を示す物質のほとんどが細長い棒状か薄い板状の分子構造を持つ有機化合物であり、この独特な分子構造により様々な異方性が発現する。また液晶は液晶相の分子配列から、ネマティック(nematic)液晶、スメクティック(smectic)液晶、コレステリック(cholesteric)液晶に分類される。これらの模式図を図 2.1 に示す。スメクティック液晶は、図 2.1 (a) に示すように棒状の分子が層状構造をしており、それぞれの分子はこの相の面に垂直であるか、またはある角度をなして配列している。この分子層の層間の結合力は弱いため、互いに滑りやすい。また通常の液体の粘性に比べて極めて大きな粘性を示すことが知られている。次にネマティック液晶は、図 2.1 (b)に示すように棒状の分子が平行に配列しており、分子軸の方向は一方向に固定されるが、スメクティック液晶のような層状構造は存在しない。またスメクティック液晶に比べて粘度が小さく流動性に富んでいる。これはそれぞれの分子が、長軸方向に自由に動きやすいからである。またコレステリック液晶の分子配列の模式図を図 2.1 (c) に示す。コレステリック液晶はスメクティック液晶と同様な層状構造を持っている。しかし層内での分子配列はネマティック液晶と同様な平行配列をしている。さらに各層の分子軸方向が前後の層と分子軸と少しずつねじれており、液晶全体としてはらせん構造をしている。このらせんのピッチが可視光の波長オーダーであるため、ほかの液晶とは異なった特殊な光学的性質を示す。

これらの液晶は、独特な分子配列のため液晶が持つ屈折率、誘電率、磁化率、電導度、粘性率などが分子長軸と平行な場合と垂直な場合では異なり、異方性を持つ。このためある状態における液晶の分子軸の向きが重要な要素となる。そこで液晶分子の集まりを巨視的に見たとき、分子長軸の平均的な方向を単位ベクトルで表し、このベクトルをディレクタ (Director)  $n$  と呼ぶ。このディレクタを用いることによって液晶の分子の向きを簡単に表現することができる。また液晶の分子配列は、電場、磁場、応力などの外部場によって容易に制御できるため、これらの性質に注目して様々な分野への応用が検討されている。

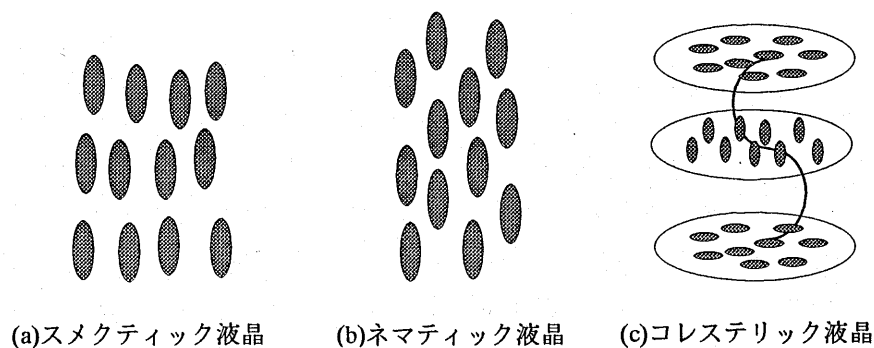


図 2.1 液晶の種類と分子配列の模式図

### 2.1.2 屈折率異方性<sup>(17)</sup>

液晶の特徴の一つである屈折率異方性は、ディレクターの向き  $\mathbf{n}$  と平行、垂直方向に対して光の屈折率が異なるため生じる。ディレクターと平行な屈折率を  $n_{\parallel}$ 、直角方向の屈折率を  $n_{\perp}$  とすると複屈折率  $\Delta n$  は、

$$\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} \quad (2.1)$$

と表される。ネマティック液晶では通常  $n_{\parallel} > n_{\perp}$  であるため、光学的に正の性質を示す。

このような屈折率異方性のため、液晶は以下のような光学的な特徴を持つ。

1. 入射光の進行方向をディレクター  $\mathbf{n}$  (分子長軸) 方向に偏光する。
2. 入射光の偏光状態 (直線、楕円、円偏光) や偏光方向を変える。
3. 入射光を左右の旋光性に応じて反射、透過する。

図 2.2 に液晶のディレクターの向きと光の透過の関係の模式図を示す。

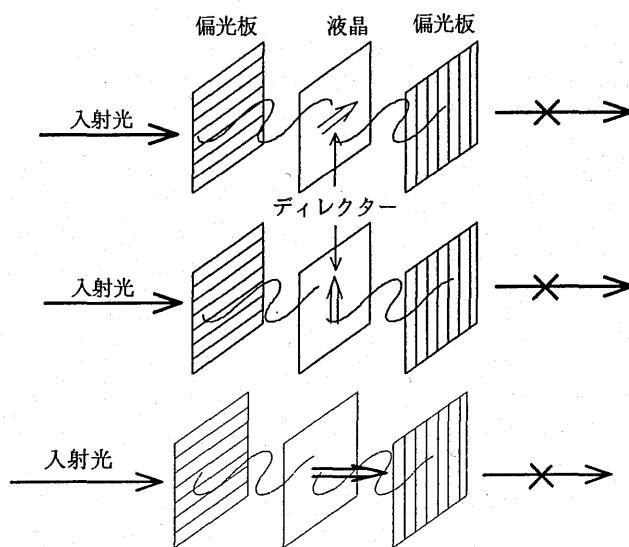


図 2.2 (a) 光を透過しない場合

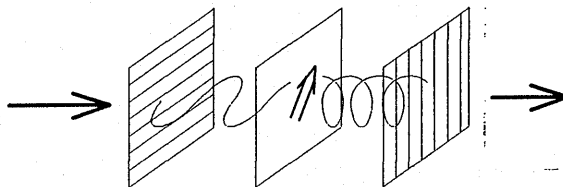


図 2.2 (b) 光を透過する場合

### 2.1.3 電場印加による分子配向<sup>(17)</sup>

液晶は屈折率異方性と同様に誘電率にも異方性がある。これは誘電率にもディレクター方向の誘電率 $\epsilon_{\parallel}$ とディレクターと直交方向の誘電率 $\epsilon_{\perp}$ が異なるためであり、誘電率異方性は次式で表される。

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} \quad (2.1)$$

誘電率異方性によって電場印加時に他の流体にはない振る舞いを起こす。ここで電場印加時の液晶の振る舞いについて簡単に説明する。誘電率異方性 $\Delta\epsilon$ を持つ液晶に直流電場  $E$  を印加すると、液晶内に次式で表されるエネルギー密度  $f_e$  が生ずる。

$$f_e = -\frac{1}{2}\epsilon_{\perp} \cdot E^2 - \frac{1}{2}\Delta\epsilon(n \cdot E)^2 \quad (2.2)$$

上式右辺の第1項はディレクタの向きに依存しない項であり、右辺第2項はディレクターと電場の内積である。このエネルギー  $f_e$  がもっとも低くなる様に分子の向きが変化する。 $\Delta\epsilon < 0$  (誘電異方性が負; n 形液晶) の場合、 $n$ 、 $E$  が直交するときにエネルギーが最小となるため、図 2.3(a) に示すように電場方向と垂直に分子長軸が配向する。また  $\Delta\epsilon > 0$  (誘電異方性が正の液晶; p 形液晶) の場合、図 2.3(b) に示すように分子長軸が電場方向と平行になるように配列する。この電場印加時に液晶分子が配列する現象により、後に示すミエソヴィッツ粘度と併せて液晶の ER 効果が説明される。また液晶ディスプレイは、屈折率異方性と誘電率異方性によって光の透過を制御することにより表示を行う。

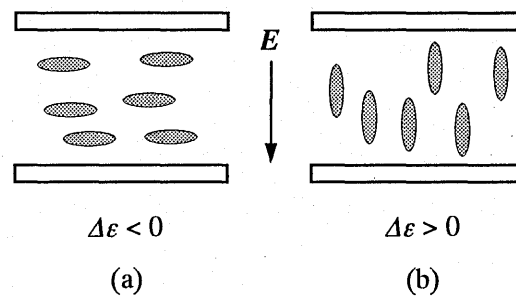


図 2.3 誘電異方性の正負による電場印加時の液晶の配向の変化

### 2.1.4 粘度の異方性<sup>(18)</sup>

液晶分子の粘度には流れのせん断力とディレクタの向きを考慮すると図 2.4 に示すような 3 種類の関係が考えられる。このため粘度にも異方性が考えられる。ミエソヴィッツ(Miesowicz)は、強い磁場をかけ試料を配向させ、以下の 3 通りの場合について粘度を測定した。

$\eta_1$  : ディレクターが速度勾配に平行する場合

$\eta_2$  : ディレクターが流れ方向と平行する場合

$\eta_3$  : ディレクターがせん断力、流れ方向に垂直な場合

これら h ミエソヴィッツの粘度として知られている。

このときの粘度の大きさは一般には  $\eta_2 < \eta_3 < \eta_1$  となる。通常の電圧を印加しない場合では、ほぼ  $\eta_2$  と等しく、ディレクターは流れの方向に平行になる。しかし液晶に電圧を印加すると液晶の配向が変化するため、流れ場と液晶のディレクターの向きが変化する。誘電異方性が正の場合ではミエソヴィッツの粘度が、 $\eta_2$  から  $\eta_1$  へ変化し、見かけの粘度が変化すると考えられている。図 2.5 に誘電異方性が負である MBBA に対する Miesowicz の粘度の温度依存性の測定例を示す<sup>(18)</sup>。

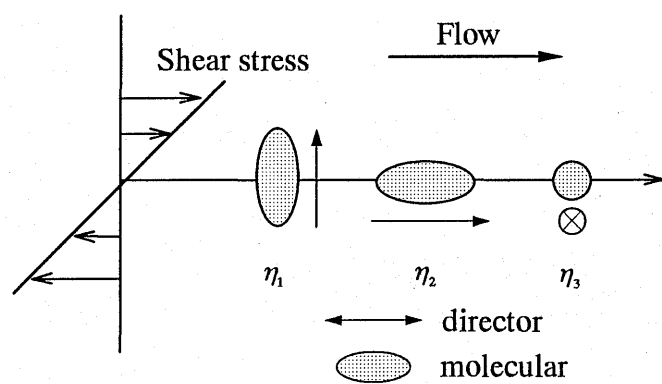


図 2.4 Miesowicz の粘度

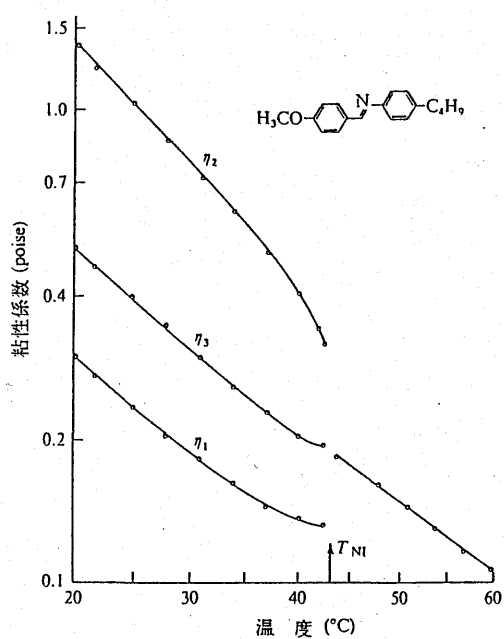


図 2.5 Miesowicz の粘度の測定例<sup>(18)</sup> (MBBA)

### 2.1.5 電氣的不安定性現象と動的散乱効果<sup>(17)(19)</sup>

誘電異方性が負の液晶に対して直流または低周波数の交流電圧を印加すると、ある電圧を超えると明確な光学的パターンが観察される。低周波数領域では、あるしきい値電圧( $V > V_w$ )を超えるとセル厚と同程度の空間的周期を持つ静止した縞状パターンが現れる。このパターンはウィリアムズドメイン(Williams domain)と呼ばれ、液晶が対流することによって生じる。さらに電圧を上げていくとこのパターンが運動し始め、不規則で複雑なパターンに変化し、対流状態から乱流状態へ変化する。この場合には光を強く散乱させるため、動的散乱(dynamic scattering: DS)効果と呼ばれている。これらは液晶の流動が主体となって生じるので電氣流体力学的不安定性領域(electrohydrodynamic instability)と呼ばれる。この発生機構を以下に説明する。

電極より電圧が印加されると電荷が注入される。この電荷を受けて液晶分子はイオンとして電場より力を受け流れる。その際に流動抵抗を下げようとして分子軸は流れ方向に揃おうとする（流れ配向：flow alignment）。これは、分子軸が流れに直角に配列するよりは平行に配列した方がイオン流にとっては流れやすいためであり、電氣伝導度の異方性によるものである。しかし誘電異方性が負の液晶では、電圧印加時の配向が誘電異方性により電場方向とディレクターが直交するように働くため、誘電異方性による配向とイオン電流による配向が逆のトルクを生み出す。また液晶は、分子の相互作用によって集団配向しようとするので電圧が弱い間は安定状態にある。しかし電場を強くしていくにつれ、この釣り合いが壊れ乱流状態へ変化する。これらの電氣的不安定性現象による光学的パターンと液晶の分子配列の様子を図 2.6 に示す。

また高周波数領域( $f > f_c$ )では、ウィリアムズドメインより空間的周期の狭い静止した光学的細縞状パターンがかなり高い電圧で現れる。さらに電圧を上げるとねじれた縞状パターンへ変化する。これはシェブロン(chevron)縞状パターンと呼ばれる。この高周波数領域では誘電的トルクが支配的となるので誘電的不安定性(dielectric instability)領域と呼ばれる。

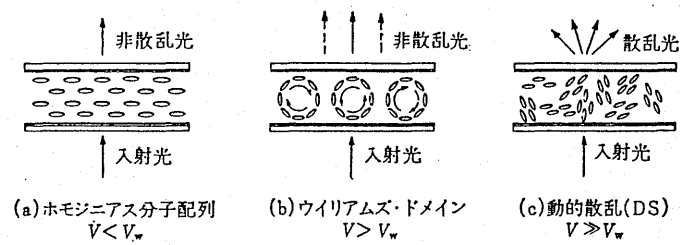
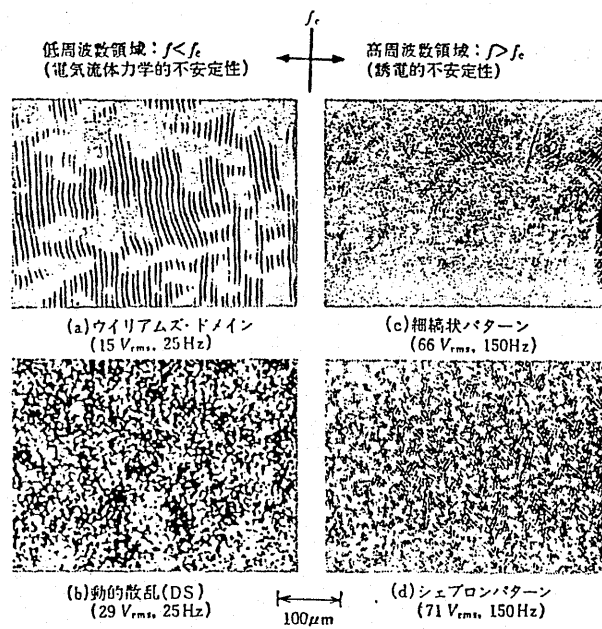


図 2.6 電気的不安定性による光学パターンと動的散乱が起こるまでの液晶の分子配列の状態変化<sup>(17)</sup>

## 2.2 MBBA（誘電異方性が負の液晶）

本研究では、誘電異方性が負の液晶として MBBA [*N*-(4-methoxybenzylidene)-4'-n-butylaniline] を用いた。MBBA は、20℃から 47℃の間で液晶性を示すネマティック液晶であり、比較的簡単な分子構造を持つ有機化合物である。本研究では Aldrich 社製純度 98%、分子量 267.37 密度 1.027 の MBBA を用いた。図 2.7 に MBBA の分子構造を示す。また実験に用いた試料は、液晶 MBBA と、MBBA に導電性ドーパント TBAB [Tetrabutylammonium Bromide] を液晶に対して重量濃度で 100ppm 添加したものの 2 種類を用いた。導電性ドーパントについては後に解説する。また平行円板型回転粘度計で測定した MBBA と MBBA+TBAB の電圧を印加しないときの粘度測定結果を図 2.8 に示す。図より明らかなように、TBAB を添加することによって粘度の変化は起こらない。またどちらの試料もひずみ速度によって粘度が変化しないニュートン粘性を示す。

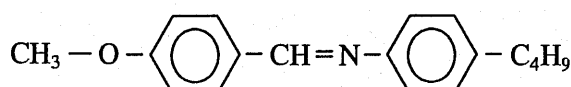


図 2.7 MBBA の分子構造と転移温度

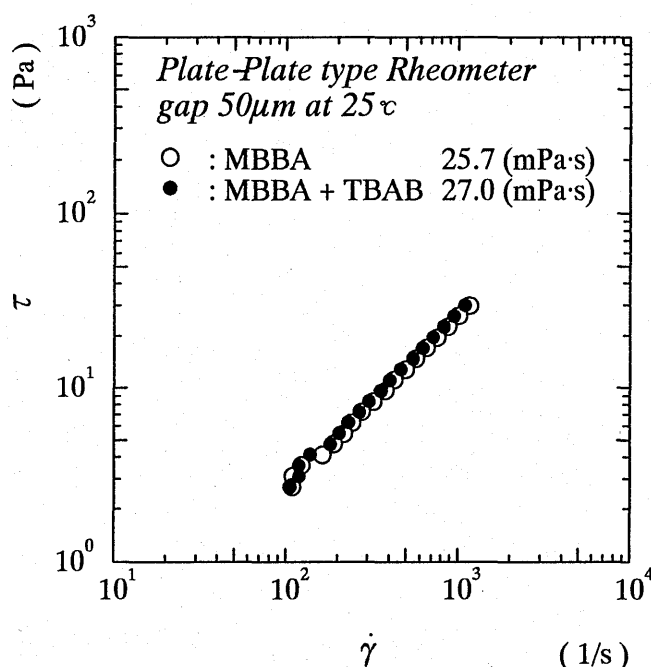


図 2.8 MBBA, MBBA+TBAB の電圧無印加時の粘度測定結果

本研究で添加した導電性ドーパントとは、液晶の比抵抗を低下させる目的で液晶に添加する物質のことを指す<sup>(17)</sup>。液晶の動的散乱効果を得るためには、ある程度の電流が流れなければならないため、そのため不純物を添加することによって液晶の比抵抗を下げることもある<sup>(17)</sup>。また直流や交流電圧印加時に適切な DS 効果用ドーパントを選ぶことにより、液晶の劣化を防ぐことができる。これは電極での酸化還元反応に対して、液晶よりドーパントの方が反応しやすい場合、液晶が電極反応に関与しなくなるため劣化が押さえられる。また導電性ドーパントを液晶に加えることによって、比抵抗が低下し DS 効果の遮断周波数  $f_c$  が高くなることが知られている<sup>(17)</sup>。

図 2.9 に DS 効果用ドーパント TEAB [Tetraethylammonium bromide] を添加した場合の液晶の比抵抗と添加濃度の関係を、また図 2.10 に比抵抗と遮断周波数の関係を示す<sup>(17)</sup>。

また本研究で得られた交流電圧印加時のしきい値電圧と励起周波数の関係を図 2.11 に示す。本研究では実験装置の限界のため、明確な  $f_c$  を測定することはできなかった。また偏光顕微鏡観察においても chevron パターンは観察できなかった。本研究で観察された Williams domain と動的散乱状態の偏光顕微鏡撮影の例を図 2.12 に示す。

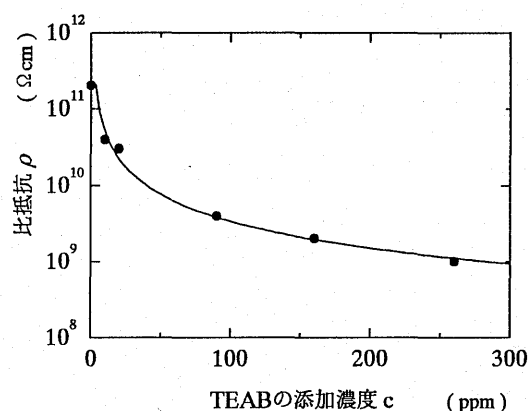


図 2.9 N<sub>n</sub> 液晶の比抵抗 $\rho$ と TEAB の添加濃度  $c$  の関係

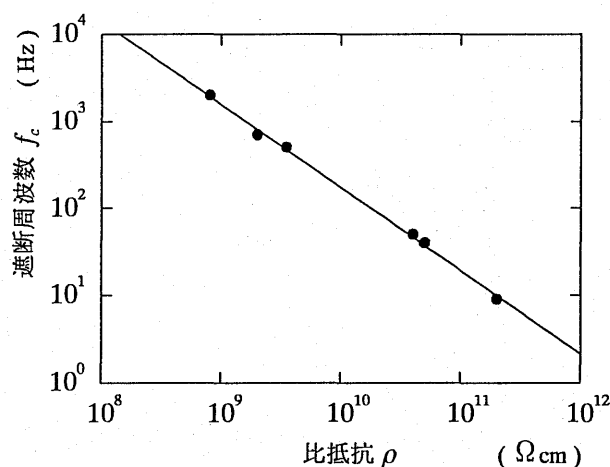


図 2.10 N<sub>n</sub> 液晶の比抵抗 $\rho$ と遮断角周波数  $f_c$  の関係

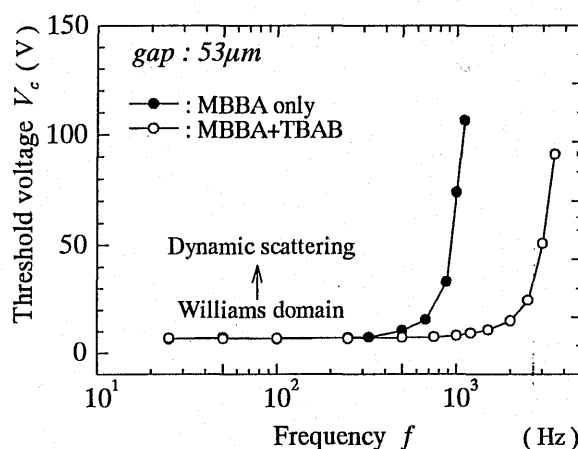


図 2.11 MBBA, MBBA+TBAB の励起周波数  $f$  としきい値電圧  $V_c$  の関係

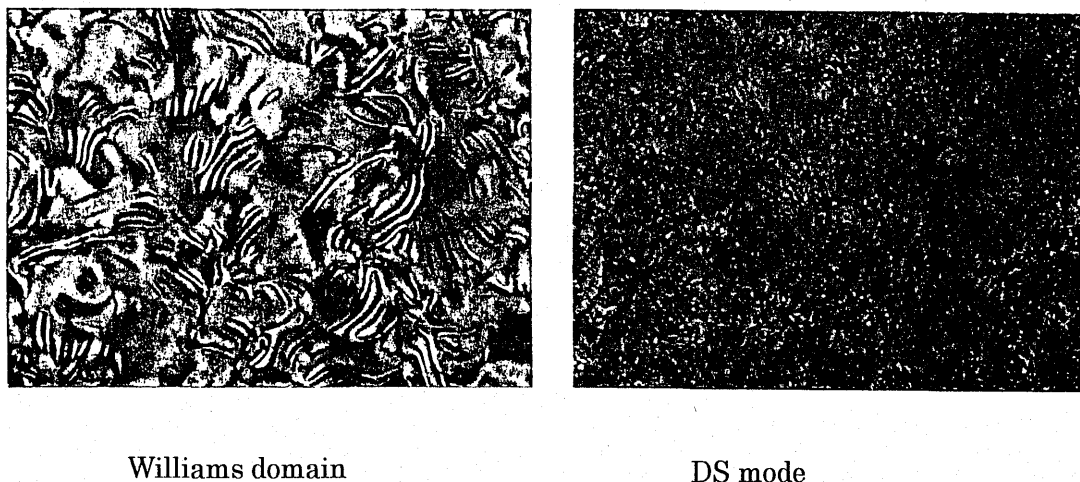


図 2.12 Williams domain と DS モードの偏光顕微鏡写真

### 2.3 誘電異方性が正の液晶

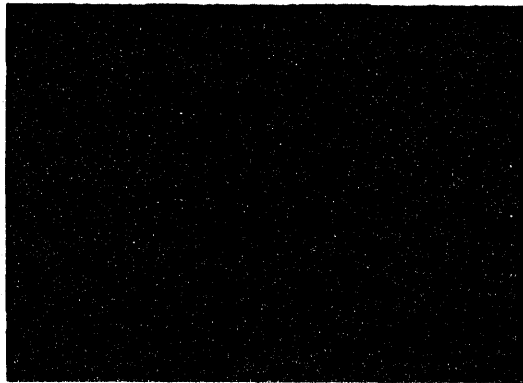
本研究では誘電異方性が正の液晶として数種類の液晶の混合物（以後 LC と呼ぶ）を用いた。これはチッソ石油化学株式会社製の液晶ディスプレイ用の液晶であり詳しい成分は公表されていない。これは幅広い温度範囲で液晶相を示す。この混合液晶 LC の主な物性値を表 2.1 に示す。

表 2.1 混合液晶 LC の主な物性値

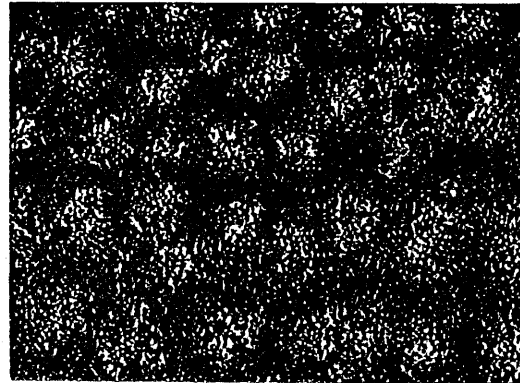
転移温度( Nematic - Isotropic )	72.2 °C
しきい値電圧( 32Hz , 25°C ) $V_{10}$	1.93 V
飽和電圧 $V_{90}$	2.69 V
粘度 ( 20°C ) $\eta$	29.1 cP
屈折率異方性 ( $\lambda=589\text{nm}$ , 25°C )	$\Delta n$ ; 0.160 $n_o$ ; 1.512
誘電率異方性 ( 1kHz , 25°C )	$\Delta\epsilon$ ; 5.6 $\epsilon_{\perp}$ ; 4.4

誘電異方性が正の液晶に対しては、実験的に DS モードや対流が観察された例もあるが、誘電異方性が負の液晶ほど電気的不安定性現象による対流機構は整理されていない。しかし笹田らは誘電異方性が正の液晶に関しても、電気粘性効果は、分子が流れと垂直に配向することによる効果と対流による効果の 2 種類の機構があると述べている<sup>(20)</sup>。しかし現在では、ER 効果の発生機構は、電場による分子配向によって生ずると考えられている<sup>(11)(12)</sup>。

本研究において誘電異方性が正である混合液晶 LC に、導電性ドーパント TBAB を重量濃度で 100ppm 添加して比抵抗を低下させたところ、直流電圧印加時の偏光観察で対流の発生が認められた。図 2.13 に電圧印加時の偏光顕微鏡観察の一例を示す。この特性の変化が液晶の ER 効果に与える影響を確かめるため、本研究では誘電異方性が正の試料として混合液晶 LC のみの場合（LC only）と、混合液晶 LC に TBAB を 100ppm 添加した試料の 2 種類を用いて実験を行った。電圧を印加しないときの粘度測定結果を図 2.14 に示す。図より明らかなように電圧を印加しない場合ではニュートン粘性を示す。また両者の間に大きな粘度の差は見られなかった。



LC only DC 1.5kV/mm



LC+TBAB DC 1.5kV/mm

図 2.13 LC only, LC+TBAB の偏光顕微鏡観察の一例

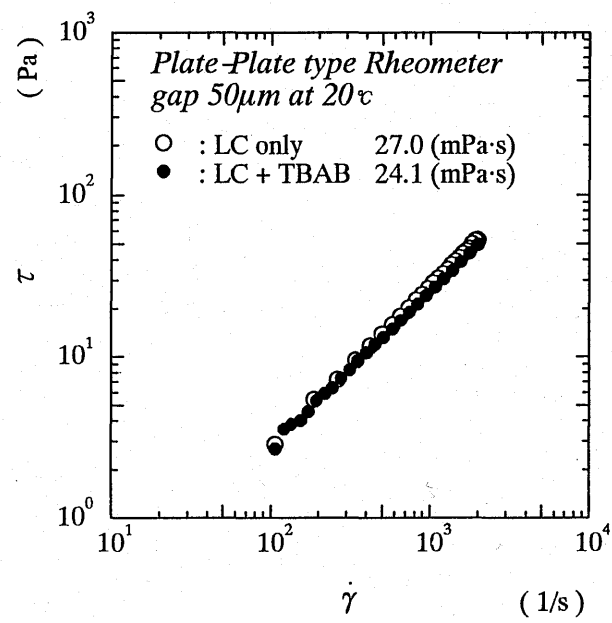


図 2.14 LC only, LC+TBAB の電圧無印加時の粘度測定結果

### 第3章 実験装置

実際の機器に ER 流体を応用する場合、流動場に対する電場の方向の関係が重要となる。また機器への応用例ではその大部分がダンパ、クラッチの応用であり<sup>(4)</sup>、せん断流動場(Couette flow)、二次元ポワズイユ流れが用いられている。そこで本研究では、液晶のせまいすきまでの ER 効果の有効性を検証するため、せん断流動場（クラッチモデル）として平行円板型回転粘度計、また二次元ポワズイユ流れ（ダンパモデル）として平行平板型 2 次元流路を用いて実験を行った。以下にそれぞれの実験装置について説明する。

#### 3.1 平行円板型回転粘度計

##### 3.1.1 実験装置及び実験方法

平行円板型回転粘度計の実験には、Haake 社製 RS50 型粘度計を用い、これに平行平板のセンサーを取り付けたシステムを用いた。本研究で用いた円板の仕様を表 3.1 に示す。これらの円板はステンレスでできており表面は研削加工されている。この RS50 型粘度計の特徴として次のような点が挙げられる。

1. 動力伝達部にエアベアリングを用いているため、高精度の応力制御が行える。
2. 高分解能で測定可能なデジタルエンコードによりひずみ量が測定できる。
3. コンピューター制御による自動測定システムにより再現性のよい測定が行える。
4. 測定に要する試料が極めて少量でよく、手軽に測定が行える。

実験装置の全体図を図 3.1 に示す。実験中の溶液の温度は恒温槽により循環する水で制御され、下部円盤の下に取り付けられた温度センサーによって計測される。ER 効果の測定には、平行平板間に電圧を印加する必要があるため、RS50 型粘度計に電圧を印加できるようにした。

下部円板と粘度計本体の間を絶縁するため、下部円板と粘度計の間にアクリル製の絶縁板を取り付け、下部円板部分と本体との固定には塩化ビニール製のボルトを用いた。上部円盤の円板部分はステンレス製であるが、軸の一部がセラミック製であるため粘度計本体との間は絶縁される。この円板に電圧を印加するため、ステンレス製のソルベントトラップ（液だめ）を作成し軸にはめ込むように取り付けた。このソルベントトラップ内に電解液（バッテリー液；希硫酸）を入れ、この電解液中に針を差し込み、電解液を介して電圧を印加できるようにした。電源には、ファンクションシンセサイザーの出力をパワーアンプで増幅したものをを用いた。このため直流、交流電圧の印加が容易であり、交流の周波数についても広い範囲の測定ができる。以下にそれぞれの機器の特長、及び主な特性を示す。

ファンクションシンセサイザーとして、株式会社エヌエフ回路設計ブロック社製ワイドファンクションシンセサイザー1930 型を用いた。これは波形の合成方式にデジタル IC を用いた直接波形合成方式を用いているため、サイン波、矩形波、のこぎり波、方形波といった各種の波形を出力できる。また周波数分解能も高く、高周波数域の波形出力が可能である。このファンクションシンセサイザーの主な特性を表 3.2 に示す。

またファンクションシンセサイザーの出力を増幅するパワーアンプは、株式会社エヌエフ回路設計ブロック社製高速電力増幅器 4020 型を用いた。これは広い周波数範囲で電力増幅ができるパワー

アンプである。出力周波数特性も高周波数域まで平坦であるため、高周波数域までひずみが生ずることなく入力波形を増幅できる。またステップ電圧入力時のオーバーシュート量もごくわずかである。このパワーアンプの主な特性を表 3.3 に示す。なお電圧印加時の印加電圧の測定、及び電流値の測定には、デジタルマルチメーターを用いた。

表 3.1 センサー定数表

Sensor system	HPP35
Plate diameter [mm]	34.995
A-Factor [Pa/Nm]	118800
M-Factor [(1/s)/(rad/s)]	0.0175

表 3.2 ファンクションシンセサイザー1630 型の主な特性

周波数帯域	0.1mHz ~ 1.2MHz (分解能 0.1mHz)
周波数確度	$\pm 5 \times 10^{-6}$ ( $\pm 5$ ppm)
出力波形	正弦波、三角波、方形波、のこぎり波
出力	30V <sub>p-p</sub> / open、15V <sub>p-p</sub> / 50 $\Omega$
AC 電圧確度	$\pm 1\%$ (1kHz, sin, 3V <sub>p-p</sub> 以上)
ひずみ率	0.1%以下 (10Hz ~ 50kHz)
DC 電圧	$\pm 15$ V / open, $\pm 7.5$ V / 50 $\Omega$

表 3.3 パワーアンプ 4020 型の主な特性

周波数帯域	DC ~ 500kHz
出力	300V <sub>p-p</sub> (DC ~ 50kHz)
応答性	オーバーシュート、サグ 5%以下
利得	20 ~ 600 倍

実験では上部円板が高電圧側、下部円板が接地側となるよう電源を接続した。印加電圧は主に電界強度で 0~1.5kV/mm、周波数 0~1kHz の間で実験を行った。

次に実験方法を示す。まず試料を下部円板に所定量セットした後、目的とする円板間距離を入力し所定の位置まで下部テーブルを移動させた。実験で用いたすきまは 50 $\mu$ m から 100 $\mu$ m とした。実験時の液温は、MBBA が 20℃で液晶相から固相へ相変化するため MBBA, MBBA+TBAB の場合は 25℃で実験を行った。また LC only, LC+TBAB の場合は 20℃で実験を行った。測定は、主にひずみ速度制御 (CR) モードで、ひずみ速度が 100~5000 の間で行った。実験ではまずはじめに電圧を印加しないときの見かけの粘度を測定し、この粘度の平均値より  $\eta_0$  を決定した。その後電圧を印加して見かけの粘度  $\eta$  を測定した。測定後数分間円板を回転させて粘度が元に戻ったことを確認した後、電圧の条件を変えて粘度を測定した。また、本実験装置における両円板間のすきまは、両円板が接触するまで下部ステージを移動し、接触した点で電極間距離が 0 となるように設定される。そこで 2 円板間の平行度をステンレス製の直径 5.995mm の球を差し込みむことで測定したところ、

平均値に対して $\pm 6\mu\text{m}$ 程度の傾きがあった。  
また実際に設定したすきまに対して正確なすきまの測定が困難であるため、ここで設定したすきまは、円板の全体に渡る平均値となると考えられる。そこで本研究で設定するすきまは $50\mu\text{m}$ 以上となるようにした。またこのすきまの値をもちいて電界強度、及びひずみ速度を算出した。

### 3.1.2 見かけのひずみ速度及び見かけの粘度の定義

平行円板型回転粘度計における見かけの粘度、見かけのひずみ速度の算出方法を示す。

本研究では平行円板間の流動場をクエット流れと仮定した。この速度場の概念図を図3.2に示す。この実験装置では、ひずみ速度が半径方向に変化するため、本実験装置におけるひずみ速度として、円盤外周部での見かけのひずみ速度を用いた。

2 平板間のひずみ速度は、中心からの距離  $r$ 、円板の角速度 $\omega$ 、円板間距離  $h$  を用いると次の式で表される。

$$\dot{\gamma} = \frac{r\omega}{h} \quad (3.1)$$

ここで速度場は、半径方向の位置によって変化するため、粘度を $\eta$ とするとせん断応力 $\tau(r)$ は中心からの距離  $r$  の関数として与えられる。

$$\tau(r) = \frac{\eta r \omega}{h} \quad (3.2)$$

よって円板外周部 ( $r=R$ )でのせん断応力及びひずみ速度は

$$\tau_R = \frac{\eta R \omega}{h} \quad \dot{\gamma}_R = \frac{R \omega}{h} \quad (3.3)$$

粘度計で測定されるトルク  $M$  は、せん断応力による円板に働くトルク $\tau(r)$ を半径方向に積分することによって求められる。

$$M = \int_0^R 2\pi r^2 \tau(r) dr \quad (3.4)$$

ここで、速度分布をクエット流れであると仮定し、流体がニュートン粘性を示すとする (3.1.2) 式と (3.1.4)より以下の関係を得る。

$$M = \frac{\pi \eta \omega R^4}{2h} \quad (3.5)$$

ここで (3.1.3)より円板外周部での見かけのせん断応力は、

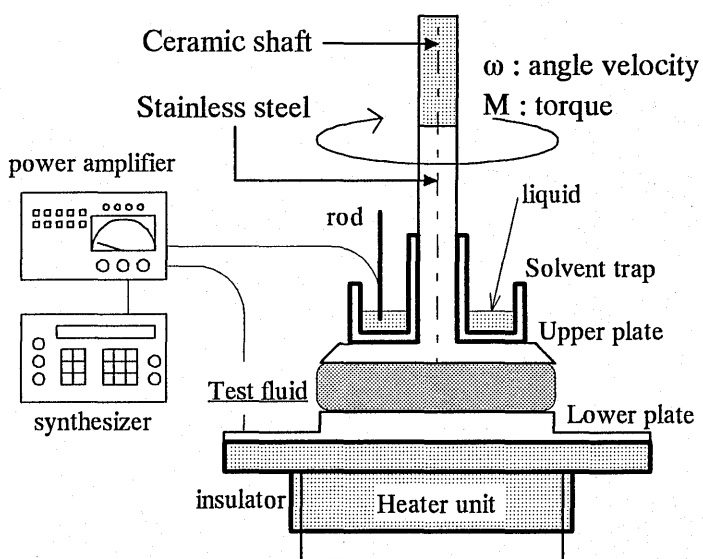


図 3.1 平行円板型回転粘度計概略図

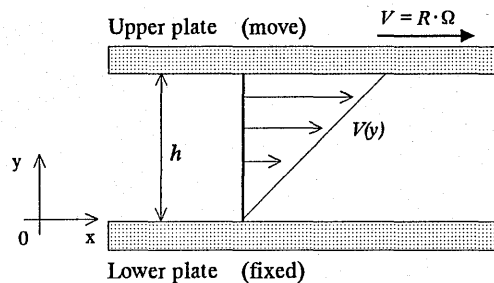


図 3.2 クエット流れの速度分布の概念図

$$\tau_{R,NEW} = \frac{2M}{\pi R^3} \quad (3.6)$$

以上の式より粘度計で測定されるトルク  $M$  より、みかけのひずみ速度の関数として円板外周での見かけのせん断応力  $\tau_{R,NEW}$  が定義される。

よって見かけの粘度  $\eta_{NEW}$  は、以下の式より計算される。

$$\eta_{NEW} = \frac{\tau_{R,NEW}}{\dot{\gamma}_R} = \frac{2M}{\pi R^3} \cdot \frac{h}{R\omega} = \frac{2h \cdot M}{\pi R^4 \cdot \omega} \quad (3.7)$$

本実験装置における実験結果は、これらの見かけの円板外周でのひずみ速度  $\dot{\gamma}_R$  をひずみ速度  $\dot{\gamma}$  として用いた。また粘度  $\eta$  は、見かけの粘度  $\eta_{NEW}$  を用いた。

## 3.2 平行平板型 2 次元流路

### 3.2.1 実験装置及び実験方法

本実験装置は微小なすきまを空けた 2 枚の平行ガラス電極間に液晶を流し、この時の流量と圧力差より粘度を算出する。この実験装置では、ダンパと同様に上流と下流の圧力差によって流れが発生するため、実際的な流れ場で実験が行える。また電極面がガラスでできているため、電極通過時の流動状況が、粘度測定と同時に観察できる。以下にこの実験装置について説明する。

試験部(test section)は、図 3.3 に示すように 2 枚のガラス電極を微小なすきまを空けて張り合わせたもので出来ている。本研究で用いた試験部は、電極間のすきまが  $10\mu\text{m}$  から  $50\mu\text{m}$ 、幅、長さは約  $10\text{mm}$  の物を用いた。このすきま、幅、長さの測定方法については後に詳細に述べる。実験で用いたガラス電極は、ガラス板の片面に ITO (酸化インジウム:  $\text{In}_2\text{O}_3$ ) 皮膜を形成したものであり、他の種類のガラス電極に比べて光透過率が高く、電気伝導率が高いという特徴がある。このガラスの上に接着剤を塗り、スペーサーとなるワイヤーを挟んで接着した。なおワイヤーがガラス電極に触れることによる導通を防ぐため、接着する電極面の一部分を塩酸で溶かしだし、ITO 皮膜を取り除いてある。

次に図 3.4 に示す流路部について説明する。流路部は、試験部であるガラス電極をアクリル製の板に接着し、周りを接着剤で整形したものであり、この流路部の流入側には、ステンレス管を取り付けたフランジがゴムパッキンを挟んで取り付けられる。流路部の流出側には、流量測定用のガラス製の目盛り付きのピペット管が取り付けられている。なおこのピペット管は、測定する流量にあわせて容量の違うもの( $0.5\text{ml}$ ,  $0.2\text{ml}$ ,  $0.1\text{ml}$ )を用意した。このピペット管内を試料が一定体積流れるのに要する時間より流量が算出される。

図 3.5 に実験装置全体図を示す。上流側のリザーブタンク内の試料は、コンプレッサーによって加圧供給されたエアータンクからの空気圧によって流路部へ供給される。そのときの圧力は上流側の水銀柱マノメータによって測定される。電極間のすきまが他の部分に比べて微小であるため、この部分で起きる圧力損失と比べると、ガラス管などの他の部分での圧力損失は小さい。このため上流側圧力を電極部での全圧力損失とした。また試験部での流動状態が観察できるように、流路全体が偏光顕微鏡に取り付けてある。電極部での流動状況は、オリンパス光学工業株式会社製の偏光顕微鏡システムを用いて、透過光による偏光顕微鏡観察を行った。なお偏光板は、流路の上下で直交となるように取り付けられている。また顕微鏡には日立電子株式会社製カラービデオカメラ KP-C210 が

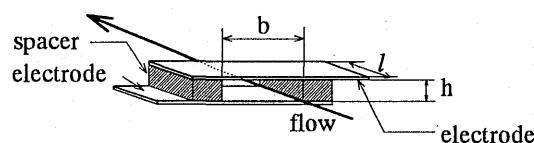


図 3.3 電極部拡大図 ( $h=10\sim50\mu m, b \approx 10mm, l \approx 10mm$ )

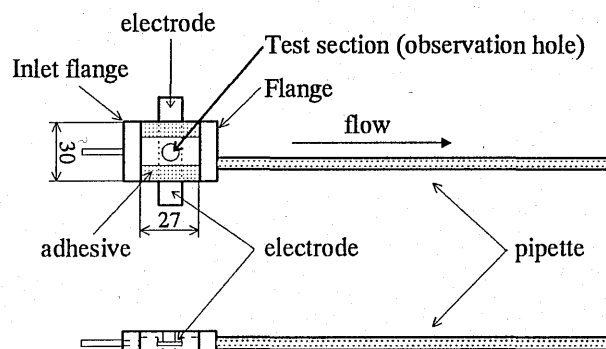


図 3.4 流路全体図

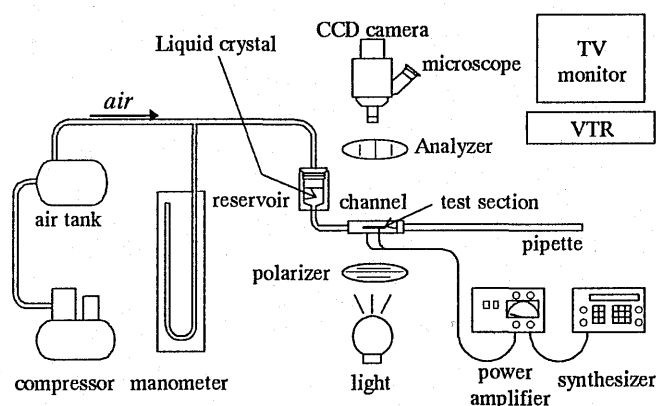


図 3.5 実験装置全体図

取り付けられており、テレビモニターによる観察及びビデオ撮影が可能である。電源は平行円板型回転粘度計に用いたのと同様にファンクションシンセサイザーとパワーアンプを用いた。

また電圧を印加したときの応答性の測定は、流路下流側のガラス管内の試料の移動する様子を高速ビデオカメラで撮影し、液柱先端の移動量より流速を算出した。これはまず高速ビデオで撮影したガラス管内の液柱の先端の位置を一定時間間隔で読みとり、この液柱の位置と撮影した時間間隔より最小二乗法で流速を算出した。またシンセサイザーの出力を並列に分け、一方をパワーアンプで増幅し流路へ印加し、もう一方は高速ビデオカメラへ入力し、ビデオカメラ上で電圧を印加した点が記録される。高速ビデオカメラはコダック社製エクタプロ EM1012 動作解析システムを用いた。撮影条件はシャッタースピード  $1/500$  ( $1/s$ )、撮影間隔  $1/500$  ( $1/s$ )で行った。

次に実験の手順について説明する。実験の前に、リザーブタンク内に試料を入れ流路に満たす。一回の実験に必要な試料は約  $1ml$  である。測定の前にコンプレッサーによってエアータンク内の空気を圧縮し、エアータンク内の圧力を調整した後、電圧をかけない状態で試料を押し流した。このときの上流側空気圧、及びピペット管内の液柱の移動時間より流量、粘度を算出した。このときの試料の移動量は最大で  $0.2ml$ 、最小で  $0.002ml$  とした。一回の測定が終わった後、ピペット管内の

試料を下流側から空気圧によってリザーブタンクの方へ押し戻した。このため試料は捨てることなく繰り返し使用した。続いて ER 効果の測定のために電圧を印加した後、リザーブタンク内に空気圧をかけ試料を押し流し、同様な測定を行って見かけの粘度を測定した。

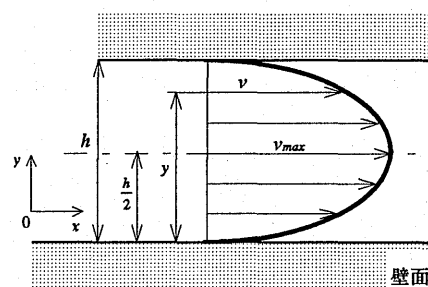


図 3.6 二次元ポアズイユ流れの速度分布

### 3.2.2 見かけのひずみ速度及び見かけの粘度の定義

平行平板間を試料が流れるとき、試料は平板間である速度分布を持って流れる。しかし電圧を印加した場合、液晶分子が電場によって配向したり、二次流が発生し対流を伴った流れになるなど流動時の速度分布を決定する事が困難である。

そこで本研究では試料が流路を流れるときの速度分布を二次元ポワズイユ流れであると仮定し、その時に算出される見かけのひずみ速度、及び見かけの粘度を用いて ER 効果を評価した。以下に見かけのひずみ速度及び見かけの粘度の算出方法を示す。二次元ポワズイユ流に対する速度分布は式 (3.8) で与えられる。このときの速度分布を図 3.6 に示す。

$$v = \left( -\frac{dp}{dx} \right) \frac{h^2}{2\eta} \left\{ \frac{y}{h} - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right\} \quad (3.8)$$

また、平均流速  $v_a$  は、

$$v_a = \frac{\left( -\frac{dp}{dx} \right) \frac{h^2}{12\eta}}{h} = \left( -\frac{dp}{dx} \right) \frac{h}{12\eta} = \frac{Q}{h \cdot b} \quad (3.9)$$

ここで電極部以外での圧力損失を無視すると、

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{p}{l} \quad (3.10)$$

となる。

壁面でのひずみ速度  $\dot{\gamma}_w$  は、 $y=0$  の条件を用いると

$$\dot{\gamma}_w = \frac{\partial v}{\partial y}_{y=0} = 6 \frac{v_a}{h} = 6 \frac{Q}{h^2 \cdot b} \quad (3.11)$$

である。同様に粘度  $\eta$  は、

$$\eta = \frac{p \cdot h^2}{12 \cdot l \cdot v_a} = \frac{p \cdot h^3 \cdot b}{12 \cdot l \cdot Q} \quad (3.12)$$

と計算される。この  $\dot{\gamma}_w$  及び  $\eta$  を本実験での見かけの壁面ひずみ速度、見かけの粘度として用いた。

### 3.2.3 すきまの算定法

本実験装置で行う測定は、流路の寸法（すきま、幅、長さ）によって大きく左右されるため、これらの測定が重要である。中でもすきまの大きさは求める粘度に大きな影響を与えるため、電極部の大きさの測定方法は以下のような方法で行った。

電極部のガラスを張り合わせた後、読みとり顕微鏡によって、10箇所程度の幅  $h$ 、長さ  $b$  を測定し、平均値を求めた。電極の端部は接着剤であるため、幅方向には最大で  $\pm 1\text{mm}$  程度差が見られた。次に流路部全体を作成し、流路に純水を流して圧力差及び流量を測定する実験を行った。このとき

の結果より、流路を純水が流れるときの速度分布を 2 次元ポワズイユ流れであると仮定すると、式 (3.12) を変形することによって次式ですきま  $h$  が計算される。

$$h = \sqrt{\frac{12 \cdot l \cdot V a \cdot \eta}{p}} \quad (3.13)$$

上式中の粘度  $\eta$  は、実験時の液温における純水の粘度を用いた。なお長さ  $l$  については、読みとり顕微鏡で測定した値を代入した。表 3.4 におけるそれぞれの流路に対するすきま  $h$  は、この実験結果の平均を用いた。すきまに関して顕微鏡で測定したところ場合  $\pm 2 \mu\text{m}$  ほどのばらつきがみられたので、この流路のすきまは平板の距離の流路全体にわたる平均的な値である。実験に用いた流路の大きさの測定結果、及びスペーサーとして用いたワイヤーの材質及び直径を表 3.4 に示す。以後本研究では呼びすきまを用いて流路を区別する。実験で用いた 3 種類の流路におけるすきまの測定結果を図 3.7、図 3.8、図 3.9 に示す。

表 3.4 実験に用いた電極部の大きさと、スペーサーの材質及び直径

呼び	50 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
すきま $h$	0.053mm	0.026mm	0.011mm
幅 $b$	11.0mm	10.1mm	6.1mm
長さ $l$	9.5mm	9.7mm	10.0mm
ワイヤーの材質	マンガン	マンガン	タングステン
ワイヤー直径	0.05mm	0.025mm	0.010mm

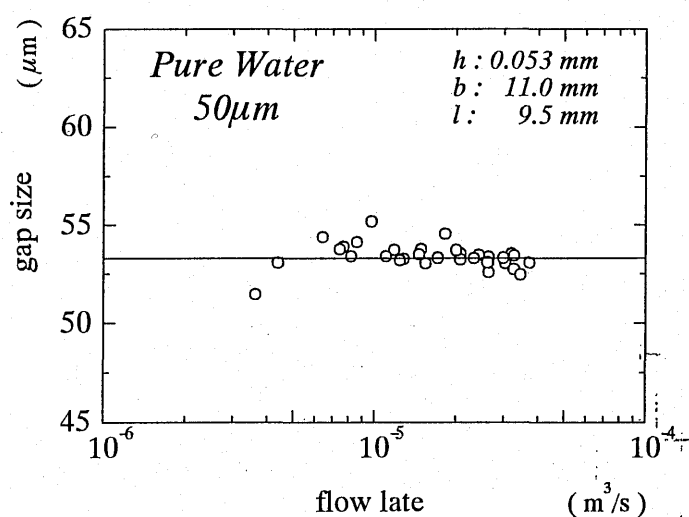


図 3.7 50 $\mu\text{m}$  流路のすきま測定結果 (流量対すきま)

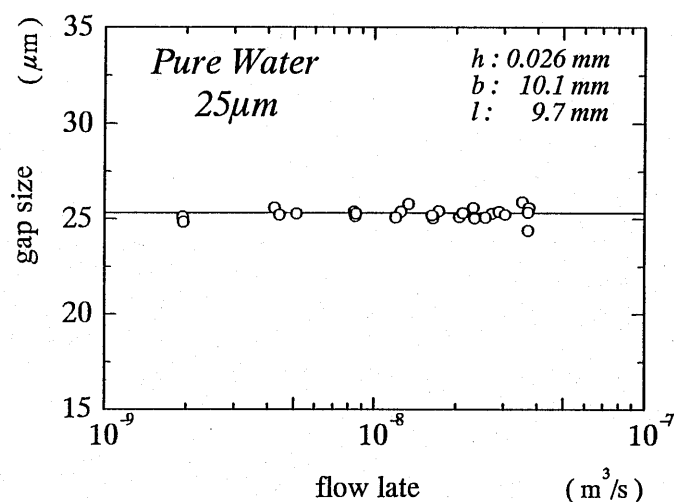


図 3.8 25 $\mu\text{m}$  流路のすきま測定結果 (流量対すきま)

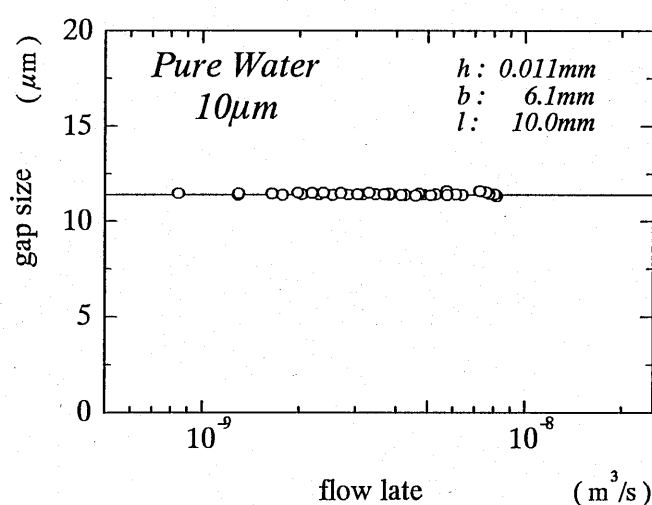


図 3.9 10 $\mu\text{m}$  流路のすきま測定結果 (流量対すきま)

## 第 4 章 実験結果

### 4.1 平行円板型回転粘度計の場合の実験結果

まず、はじめに本実験装置におけるすきまの設定法及びその精度について述べる。本装置では両円板が接触するまで下部ステージを移動し、接触した点ですきまが 0 となるように設定される。この点を基準に入力したすきまの設定値まで下部テーブルが移動する。そこでまず 2 円板間の平行度をステンレス製の直径 5.995mm の球を差し込むことによって測定したところ、最大と最小で 12 $\mu\text{m}$  程度の傾きがあった。さらにニュートン流体である流動パラフィン (粘度 26.8mPa $\cdot$ s) を用いて設定したすきまでの粘度を測定し、実際のすきまを逆算したところ、入力した設定値より最大でも +12 $\mu\text{m}$  以内の値ですきまが設定されていることがわかった。しかし個々の実験において、実際に装置で設定されたすきまに対して正確なすきまの精度の確認は困難であるため、厳密なすきまは不明であるが設定値を円板全体に渡る平均的なすきまとして便宜的に用いることとした。なお、このすきまの精度を考慮し、本実験装置で設定するすきまは 50 $\mu\text{m}$  以上とした。電界強度及びびずみ速度はこの設定すきまの値を用いて算出するため、以下の点に注意を要する。それぞれの実験において

すきまによって決定されるひずみ速度、粘度、電界強度はすきまに依存するため、これらを各実験ごとに厳密に同一の条件にそろえることが困難となる。またこれらの値は、電圧印加時の粘度増加に対して直接に影響すると考えられるため、正確なすきまが測定されていなければ、すきまをセッティングし直す数回の実験に対して、それぞれの実験結果の間で比較することができないことになる。そこで、なるべく1回のすきまのセッティングで他の条件を変化させる実験を行い、実験結果もすきまの影響を考慮しても問題ない範囲で比較している。また、結果の定量的な比較は避け、上記の精度を考慮に入れた定性的比較を行う。なお本実験装置では、まず、供試流体の ER 効果を見積もることを目的とし、次に示す両者の比較を行った。以後それぞれの実験結果について説明する。

1. 誘電異方性が負の試料に対する ER 効果の測定
2. 誘電異方性が正の試料に対する ER 効果の測定

#### 4.1.1 MBBA, MBBA+TBAB (誘電異方性が負) に対する実験結果

図 4.1 に誘電異方性が負の液晶である MBBA に直流電圧を印加した場合の、ひずみ速度に対するせん断応力の変化を表した結果を示す。図中の実線は電圧を印加しないときのせん断応力の測定結果を近似した線である。この近似線の傾きより、電圧を印加しないときではニュートン粘性を示すことがわかる。また、電圧を印加することによって低ひずみ速度域でせん断応力が大きくなった。このせん断応力の増加が液晶の ER 効果に対応する。しかし、ひずみ速度が大きくなるに従い、電圧を印加してもせん断応力は大きくなり無電場時の値に近づいていった。また低電界強度ではせん断応力はほとんど増加していない。図 4.2 に示した MBBA に TBAB を添加した場合にも同様の結果が得られた。ここでそれぞれの試料の ER 効果を明確にするため、横軸にひずみ速度をとり、縦軸には算定された粘度を、電圧を印加しないときの粘度で割った見かけの粘度増加率  $\eta/\eta_0$  で整理した図を、図 4.3、図 4.4 に示す。この粘度増加率  $\eta/\eta_0$  は電圧を印加したことによって生じる ER 効果の大きさを表している。両図から、MBBA, MBBA+TBAB のどちらの試料の場合でも低ひずみ速度域において最大で 2 倍程度の粘度増加率を示しているのがわかる。なお TBAB を添加した試料の場合、実験終了後に試料が変色しているのが観察された。この MBBA+TBAB の場合では、TBAB 添加によって電気抵抗が低下したため、流れる電流量は MBBA だけの場合と比べて 10 倍程度になる。その結果 MBBA が電極で化学反応を起こし、激しく劣化したためと考えられる。

次に MBBA 及び MBBA+TBAB において交流電圧を印加したときの周波数の影響を、電界強度が実効値で 1.5kV/mm の場合について調べた結果を図 4.5、図 4.6 に示す。これらの図における横軸は印加した交流の周波数を、縦軸はそれぞれのひずみ速度での見かけの粘度の増加率である。MBBA の場合では、粘度増加率が 75Hz 付近で極大値をとり、さらに周波数が高くなるに従い徐々に粘度増加率が小さくなっている。しかし MBBA+TBAB の場合では高周波数まで一定の粘度増加を示し、その時の粘度増加率は MBBA の場合より若干低くなっている。またある周波数  $10^3$  Hz より高い周波数になると粘度は全く増加しなくなった。

続いて他の研究例において大きな粘度増加が報告されている<sup>(11)(12)</sup>誘電異方性が正の液晶について、狭いすきまでの ER 効果について詳細に実験を行った結果について示す。

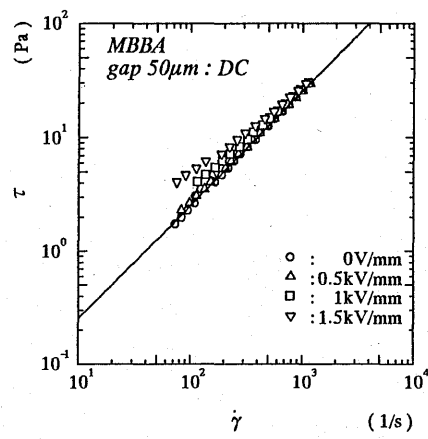


図 4.1 直流電圧印加時のひずみ速度対せん断応力 (MBBA)

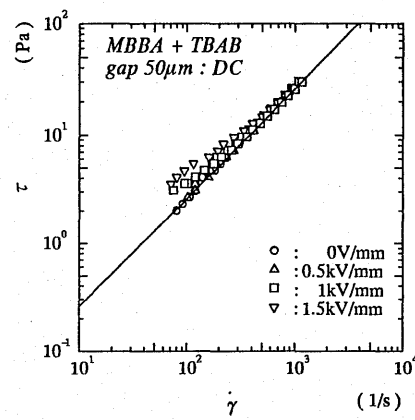


図 4.2 直流電圧印加時のひずみ速度対せん断応力 (MBBA+TBAB)

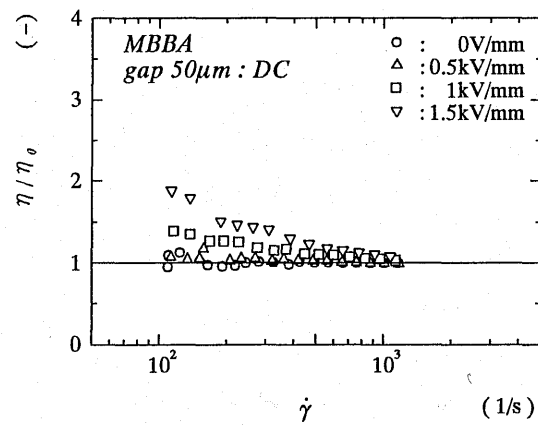


図 4.3 直流電圧印加時の粘度増加率の測定結果 (MBBA)

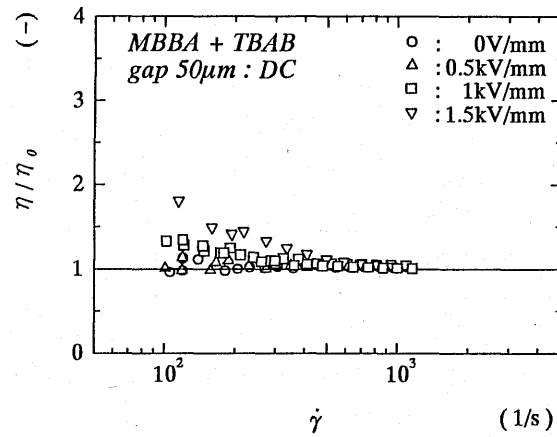


図 4.4 直流電圧印加時の粘度増加率の測定結果 (MBBA+TBAB)

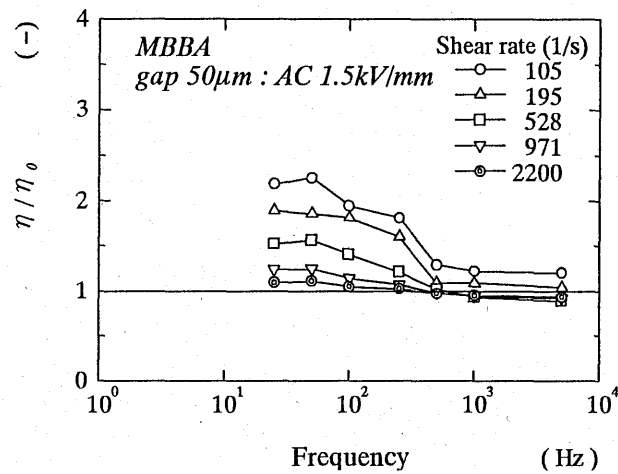


図 4.5 交流電圧印加時の粘度増加率の周波数依存性 (MBBA)

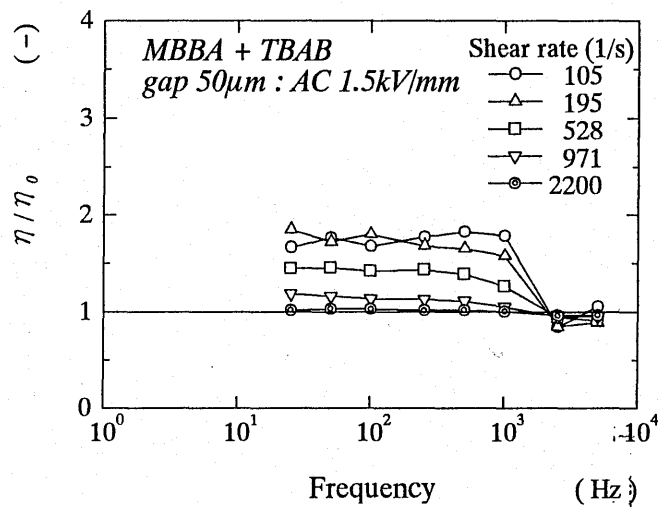


図 4.6 交流電圧印加時の粘度増加率の周波数依存性 (MBBA+TBAB)

#### 4.1.2 LC only, LC+TBAB (誘電異方性が正) の場合の実験結果

図 4.7 に誘電異方性が正である液晶 LC に、すきま 50 μm、直流電圧印加時の結果をひずみ速度対せん断応力で整理した図を示す。また LC+TBAB の場合の同様な実験結果を図 4.8 に示す。どちらの試料の場合も電圧を印加しないときは MBBA と同様にニュートン粘性を示す。また電圧を印加す

ることによって低ひずみ速度域でせん断応力が大きくなり、ひずみ速度が高くなると徐々に電圧を印加しないときの結果に近づいていった。先ほどの MBBA の場合と比較すると誘電異方性が正の試料の方が、電圧印加時のせん断応力の増加量が大きいことがわかる。また MBBA の場合よりも高いひずみ速度でも電圧印加時のせん断応力が増加した。すなわち誘電異方性が正の液晶の方が、同程度の電界強度であってもより大きな粘度増加を示すことがわかる。また LC only と LC+TBAB の場合の結果を、ひずみ速度対見かけの粘度増加率で整理した結果を図 4.9、図 4.10 に示す。どちらの場合も低ひずみ速度域では、約 5 倍の粘度増加が見られた。LC only と LC+TBAB の結果を比較すると高ひずみ速度域で LC only の方が高い粘度増加率が得られることがわかる。更に LC only の場合の電界強度の影響を表した結果を図 4.11 に示す。電界強度が 0.5kV/mm を越えるとひずみ速度が低い範囲では大きく粘度が増加しており、ある程度粘度が増加すると電界強度を大きくしてもそれ以上粘度が増加しなくなった。またひずみ速度が大きくなるに従って粘度が増加し始めるのに大きな電界強度が必要であることがわかった。

次に交流電圧を印加したときの実験結果について示す。図 4.12 は LC only に対して 50Hz の交流電圧を、電界強度を変えて印加した場合の実験結果である。交流電圧印加の場合でも低ひずみ速度域で 5 倍程度の粘度増加が起こっており、直流電圧印加の場合と同程度の粘度増加を起こした。また電界強度が高いほど高いひずみ速度域でも粘度が増加しており、交流の電界強度の影響は、直流電圧印加時と同様な傾向を示した。

次に交流電圧印加時の周波数による影響について検討する。まず図 4.13 に LC only の場合の印加電圧 1.5kV/mm の場合の周波数対粘度増加率の関係を示す。この図において、ひずみ速度が大きい場合には粘度増加の割合が小さいため周波数の変化による影響は見られないが、ひずみ速度が小さい場合には周波数が 100Hz までは周波数が高くなるに従い粘度増加が大きくなっている。しかし 100Hz 以上ではそれ以上粘度は増加せず、周波数によらずほぼ一定の粘度増加を示した。また LC+TBAB の場合の同様な実験結果を図 4.14 に示す。この場合も LC only の場合と同様の傾向が見られ、ひずみ速度が数百程度の場合、周波数が 500Hz 程度までは粘度が周波数とともに増加した。しかしそれ以上の周波数では変化しなくなった。MBBA、MBBA+TBAB の場合と比較すると、LC only、LC+TBAB の場合では、周波数が高くなる方が粘度増加率が大きくなるという逆の結果となっている。また本研究の範囲内では LC only、LC+TBAB のどちらも MBBA や MBBA+TBAB ほど周波数によって ER 効果に影響を受けないことがわかる。

また、すきまを変えたことによる粘度増加への影響に関しては、すきまの精度の問題でこの実験装置で厳密な検討は困難であるため、すきまの影響の定量的検討は、次節で示す平行平板型 2 次元流路を用いた場合の実験結果で行うとして、ここでは定性的検討を加えた結果を簡単に述べる。

すきまの変化による影響の定性的な傾向を把握するため、代表例としてすきまの設定値 100 $\mu\text{m}$  に対する LC only の場合の直流電圧印加及び交流電圧印加時の周波数の影響について検討した調べた結果を示す。なお、この場合では、すきまの設定値 100 $\mu\text{m}$  に対して実際のすきまは 10 $\mu\text{m}$  程度大きくなることが流動パラフィンを用いた実験によって確かめられている。まず、図 4.15 に直流電圧印加の場合の結果について示す。この場合では、すきま 50 $\mu\text{m}$  の LC only の実験結果と同様に低ひずみ速度域で 5 倍程度粘度が増加している。また電界強度が大きくなると粘度増加が大きくなる。また図 4.16 に示す周波数変化の影響を調べた図ではこれまでのすきまが 50 $\mu\text{m}$  の実験結果と同じ傾向が見られている。以上からこの程度のすきまの違いでは電圧印加による粘度増加の傾向は顕著には

変わらないことがわかる。

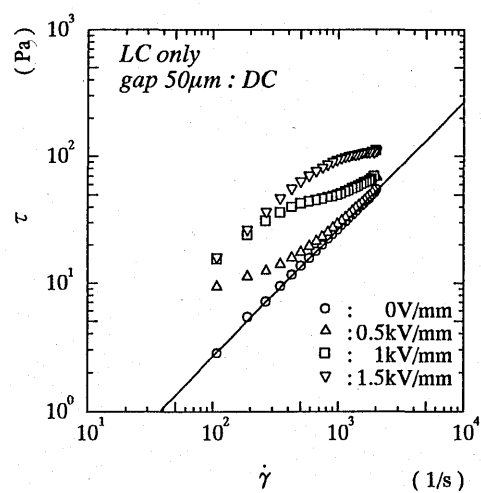


図 4.7 直流電圧印加時のひずみ速度対せん断応力 (LC only)

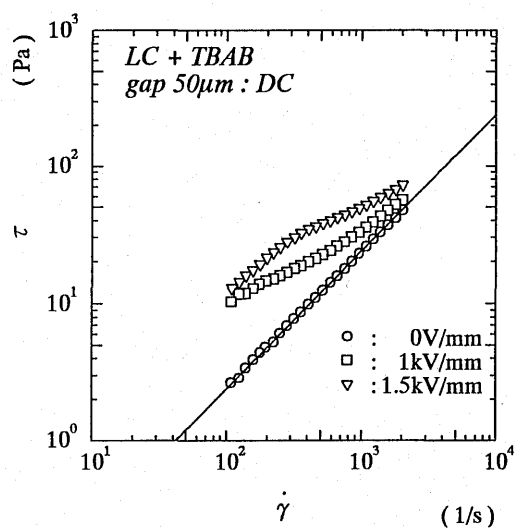


図 4.8 直流電圧印加時のひずみ速度対せん断応力 (LC+TBAB)

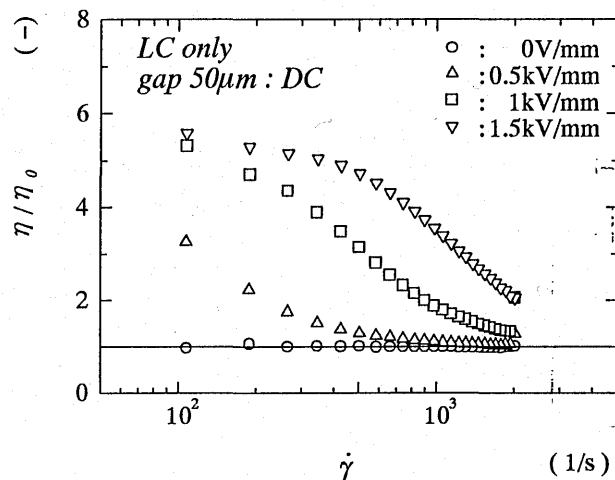


図 4.9 直流電圧印加時の粘度増加率の測定結果 (LC only)

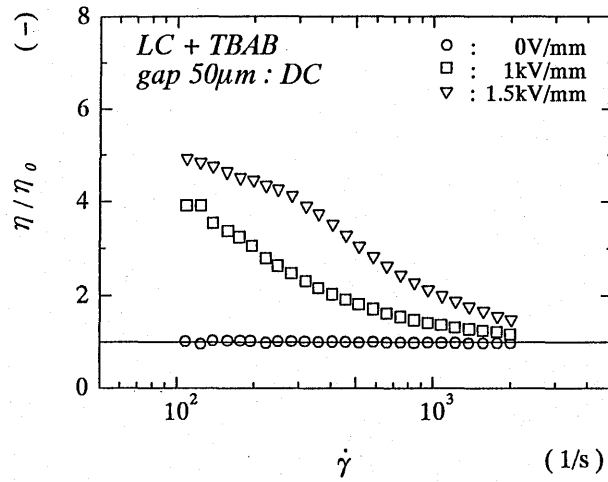


図 4.10 直流電圧印加時の粘度増加率の測定結果 (LC+TBAB)

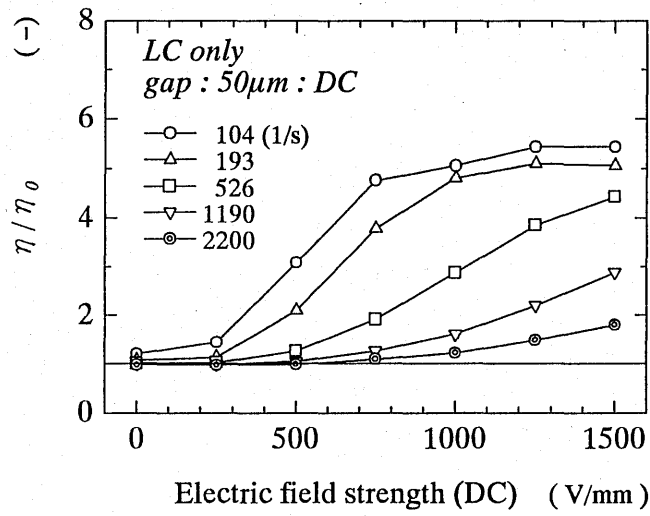


図 4.11 直流の電界強度による粘度増加率の影響 (LC only)

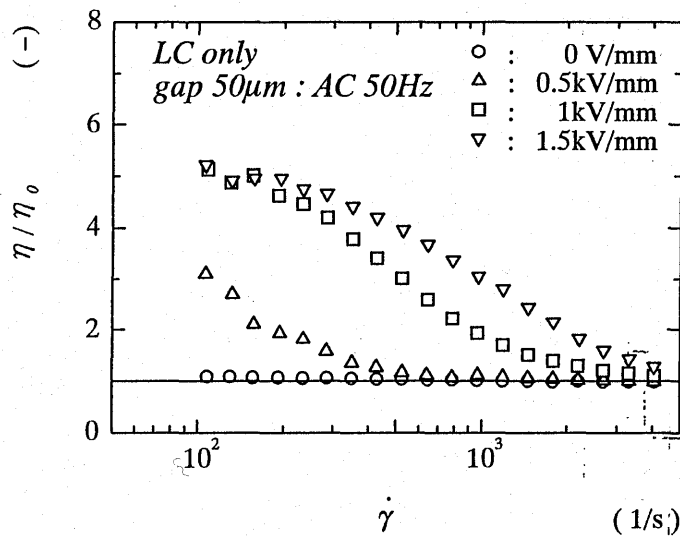


図 4.12 交流の電界強度による粘度増加率の影響 (LC only)

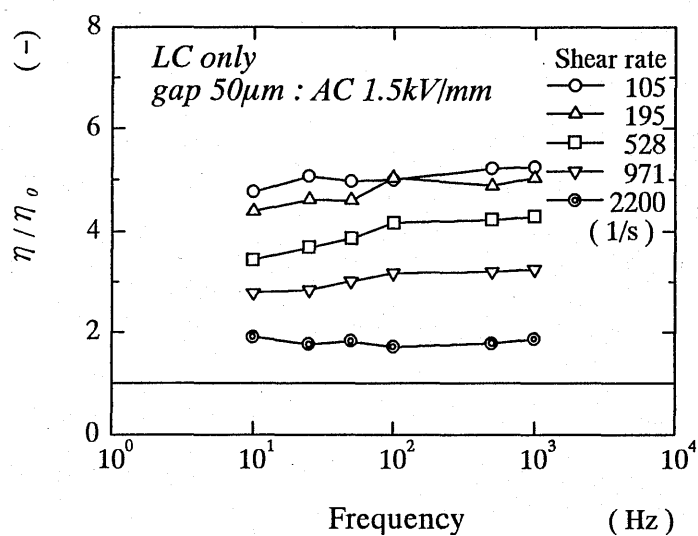


図 4.13 交流の周波数による粘度増加率の変化 (LC only)

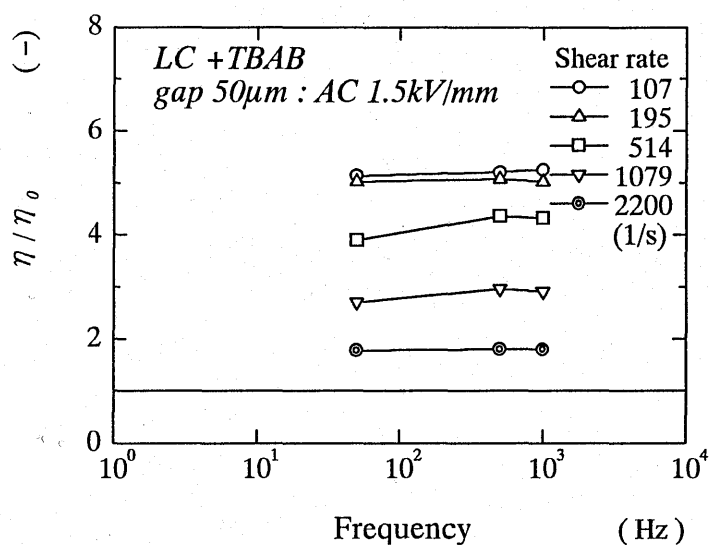


図 4.14 交流の周波数による粘度増加率の変化 (LC +TBAB)

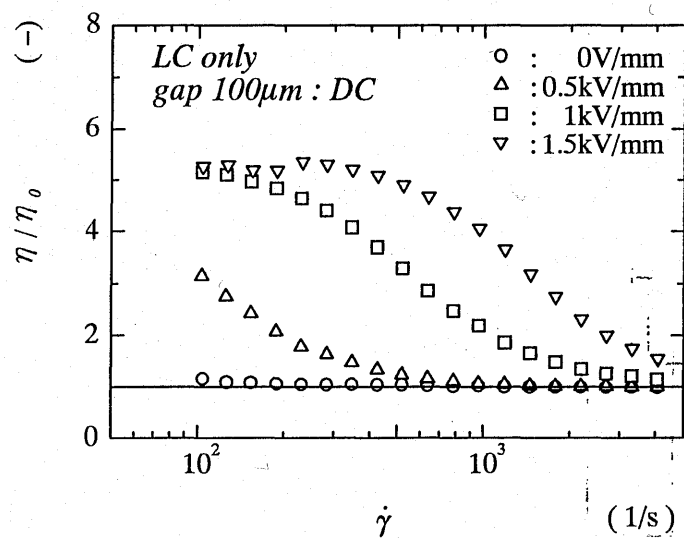


図 4.15 すきまが  $100\mu\text{m}$  の場合の直流電圧印加時の結果 (LC only)

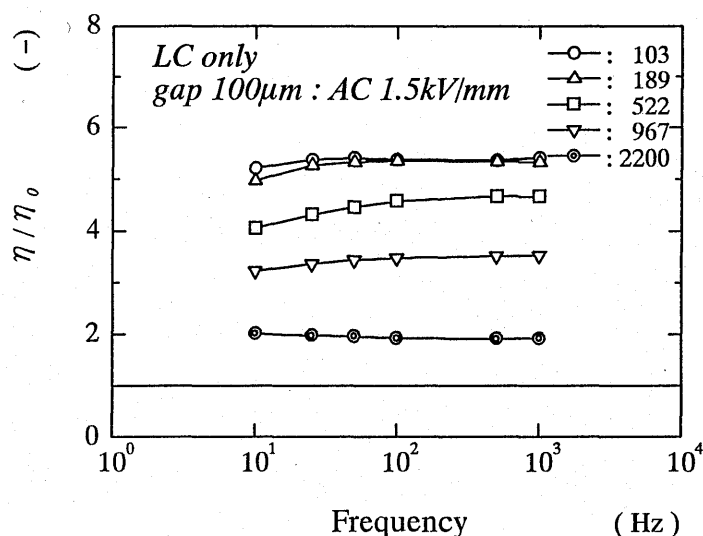


図 4.16 すきまが  $100\mu\text{m}$  の場合の周波数の影響 (LC only)

## 4.2 平行 2 平板型流路における実験結果

平行 2 平板型流路の実験装置では、液晶の電気粘性効果の測定と同時に偏光顕微鏡によって電極間の流動状態を観察できるため、ER 効果の発生機構に対する検討が可能である。そこで回転粘度計における実験によって測定された試料の中でも、比較的大きな ER 効果が期待される誘電異方性が正の液晶 (LC only, LC+TBAB) について以下のような検討を行った。

1. 流動状態における電極間の偏光顕微鏡観察
2. 直流電圧印加時の配向状態と対流状態の違い
3. 交流電圧印加時の ER 効果の測定
4. すきまの影響
5. 電圧印加時の時間応答

これらのことを検討するために  $50\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$  の流路を用いて実験を行った。以下にそれぞれの流路における実験結果について示す。

### 4.2.1 すきま $50\mu\text{m}$ の場合の実験結果

まず電極間のすきまが  $50\mu\text{m}$  の場合の実験結果を示す。実験に先立ち行った偏光顕微鏡観察において LC only の流動時に直流電圧を印加した場合、図には示さないが電界強度が  $1\text{kV/mm}$  の場合ではひずみ速度が 600 以下で、 $1.5\text{kV/mm}$  の場合ではひずみ速度が  $1500(1/\text{s})$  以下で電圧印加後に配向状態が観察された。しかし流動中に徐々に配向状態が崩れ始め、最終的には対流を伴った流れに変化していった。そこではじめに LC only の場合の直流電圧印加時の配向の安定性について検討した。

図 4.17 に偏光顕微鏡観察による配向状態の変化の様子を示す。図 4.17(a) は電界強度  $1.5\text{kV/mm}$ 、電圧印加直後のひずみ速度が  $710(1/\text{s})$  の場合であり、図 4.17(b) は電界強度  $1\text{kV/mm}$  のひずみ速度  $410(1/\text{s})$ 、図 4.17(c) は電界強度  $1.5\text{kV/mm}$ 、ひずみ速度  $420(1/\text{s})$ 、図 4.17(d) は、電界強度  $1.5\text{kV/mm}$ 、ひずみ速度  $200(1/\text{s})$  の場合の結果である。これらの場合において電圧印加直後は液晶が一様に配向した状態で流れていた。しかし時間が経つにつれて流れに乱れが生じ始め、この乱れが発達し対流を伴った流れに変化していった。それぞれの場合で比較してみるとひずみ速度が大きいほど乱れが発達するまでの時間が早くなっている。電圧印加直後のひずみ速度が同程度の結果

図 4.17(b), 図 4.17(c)を比較すると、乱れが生じ始める時間は同程度であるが乱れの発達が電界強度によって異なり、電界強度が大きい方が対流状の流れが大きい。更にひずみ速度が小さくなると、乱れが発達するのに必要な時間も長くなった。そこでこの流動状態の変化が粘度増加に及ぼす影響を明らかにするため、横軸に電圧印加後の経過時間を用い、縦軸にある時刻での電極間の平均流速  $V$  を電圧印加直後の配向状態での平均流速の平均値  $V_a$  で割った流速の変化率を用いて整理した結果を示す。図 4.18 は、電界強度が  $1\text{kV/mm}$  の場合の結果であり、図 4.19 は電界強度が  $1.5\text{kV/mm}$  の場合である。なお図中に示したひずみ速度は、配向状態の流速の平均値  $V_a$  より算出した値である。

先ほどの写真で示した電界強度  $1.5\text{kV/mm}$  印加時のひずみ速度が  $710(1/\text{s})$  の図 4.17(a) と比較してみると、流れに乱れが生じ始める 30 秒程度から流速も大きくなり、乱れが発達するにつれてさらに流速も増加していくのがわかる。また図 4.18 と図 4.19 においてひずみ速度が同程度で、電界強度が違う図 4.17(b) と図 4.17(c) の場合を比較してみると、流速が増加し始める時間はほぼ同程度であるが、電界強度が大きい方が乱れはじめてからの流速の変化が小さくなっている。これは同程度のひずみ速度であれば、主流方向の力は同程度と考えられる。また電界強度が大きい方が対流によっておこる流動抵抗が大きい。このため主流方向の力が同程度であれば、見かけの流動抵抗は大きくなる。このため電界強度が大きい方が、流速の変化が小さくなったと考えられる。

またひずみ速度が低い図 4.17(d) の場合、流れの状態が配向から対流へ変化しても流速の増加は見られなかった。これはひずみ速度が低い場合、対流によって生じた流動抵抗よりも主流方向の力が小さく、対流による流動抵抗によって配向状態と同程度の粘度増加が起こると考えられる。しかし、ひずみ速度が大きくなると、それに伴って主流方向の力が大きくなり、この主流方向の力が対流による流動抵抗よりも遙かに大きくなり、粘度が増加しないと考えられる。

次に LC only の試料に対して直流電圧印加時の粘度増加を明らかにするため、横軸に見かけの壁面ひずみ速度を、縦軸に見かけの粘度増加割合をもちいて整理した結果を図 4.20 に示す。なお、この実験結果は電圧印加直後の配向状態での粘度増加率を整理したものである。

図より明らかなように低ひずみ速度域で 5 倍程度まで粘度が増加しているが、ひずみ速度が大きくなると粘度の増加率は小さくなった。また、電界強度が大きくなると粘度増加が大きくなるが、低ひずみ速度域で得られる最大の粘度増加率は上限があることがわかる。これらの傾向は平行円板型回転粘度計を用いた場合の実験結果と同様な傾向を示した。次に LC+TBAB の試料を用いた場合の直流電圧印加時の実験結果を図 4.21 に示す。この場合も LC only の場合と同様な傾向を示したが、低ひずみ速度域での粘度増加率は約 4 倍と LC only の時の 5 倍よりも小さくなった。ここで LC+TBAB の場合の電極間の偏光顕微鏡観察例を図 4.22 に示す。図に示すように流れがない場合でも試料が対流する様子が観察されており、流れがある場合も乱れた状態であった。なお、LC only の場合とは異なり、すべてのひずみ速度の範囲で電圧印加直後より対流を伴った乱れた流動状態が観察された。

以上の結果より、これらの試料の粘度増加は配向による場合と対流による場合の 2 種類の機構があり、配向状態と対流状態では、配向状態の方が粘度増加率は大きいことがわかった。ただし、配向状態には安定性の点で問題があり、時間の経過とともに対流状態へ変化していくことがわかった。

次に交流電圧印加時の周波数特性について調べた結果について示す。電界強度  $1.5\text{kV/mm}$  の場合の LC only に対する実験結果を図 4.23 に示す。周波数が高くなるほど粘度増加が大きくなっているが、 $500\text{Hz}$  以上ではそれ以上の粘度増加は見られない。また低ひずみ速度域ではすべての周波数で

4 倍程度まで粘度が増加した。

また図 4.24 に LC+TBAB の場合の同様な実験結果を示す。この場合も LC only の場合と同様に 500Hz 以上の周波数では同じ値を示しており、低ひずみ速度域で 4 倍程度粘度が増加した。しかし、低周波数域での周波数依存性は LC only の場合よりも小さい。次に図 4.25 に LC only、LC+TBAB の交流電圧印加時の偏光顕微鏡観察例を示す。これらから、同程度のひずみ速度の場合、どちらの試料の場合でも分子が配向した状態で流動していることがわかる。また周波数の影響も偏光顕微鏡観察からは見られなかった。

以上の結果より、LC only と LC+TBAB の間には粘度増加率の大きな差が生じなかったのはこの流動状態に差がなかったためと考えられる。以上のことより交流電圧印加時では LC only、LC+TBAB のどちらの場合でも分子配向によって ER 効果が発生することが明らかになった。なお、この配向状態は、時間が経っても維持され、流速の増加も変化も観察されなかった。

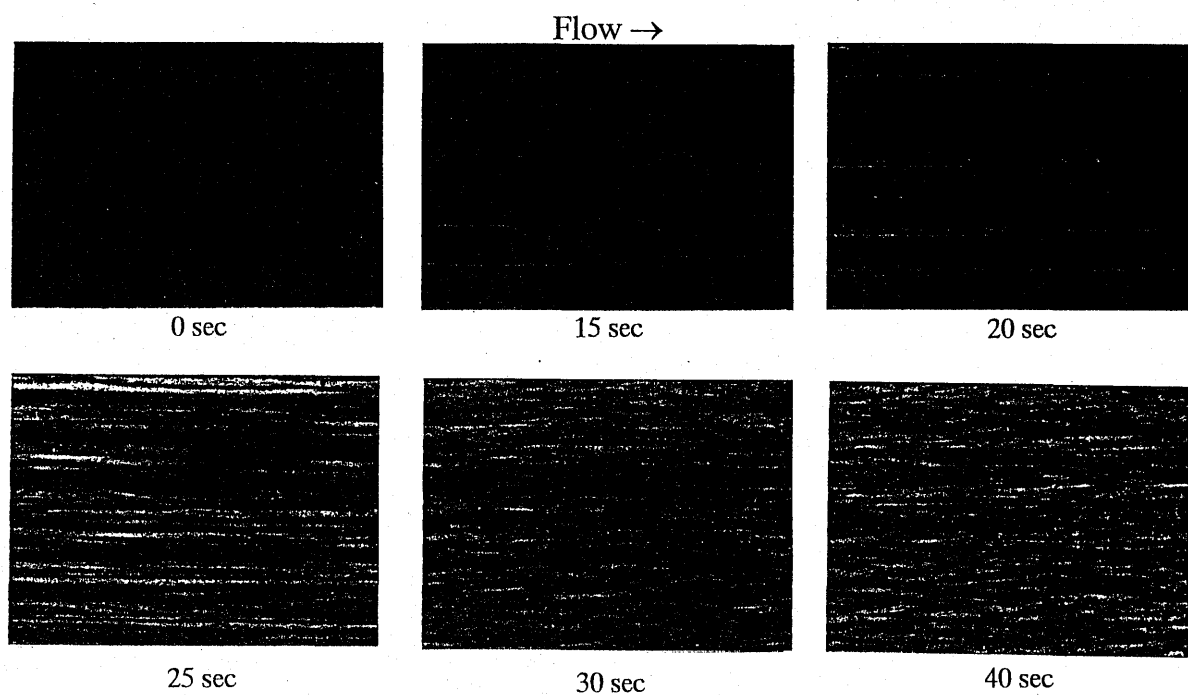


図 4.17 (a) ひずみ速度 710 (1/s) 電界強度 1.5kV/mm の場合の流動状態の変化

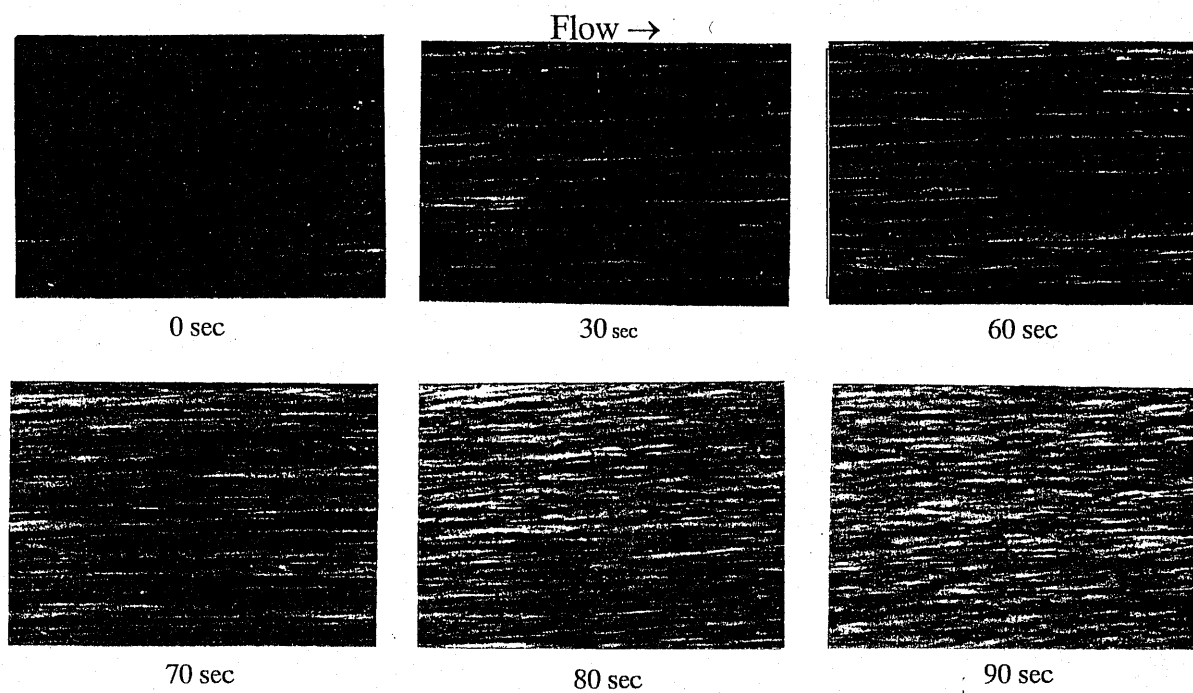


図 4.17 (b) ひずみ速度 410 (1/s) 電界強度 1kV/mm の場合の流動状態の変化

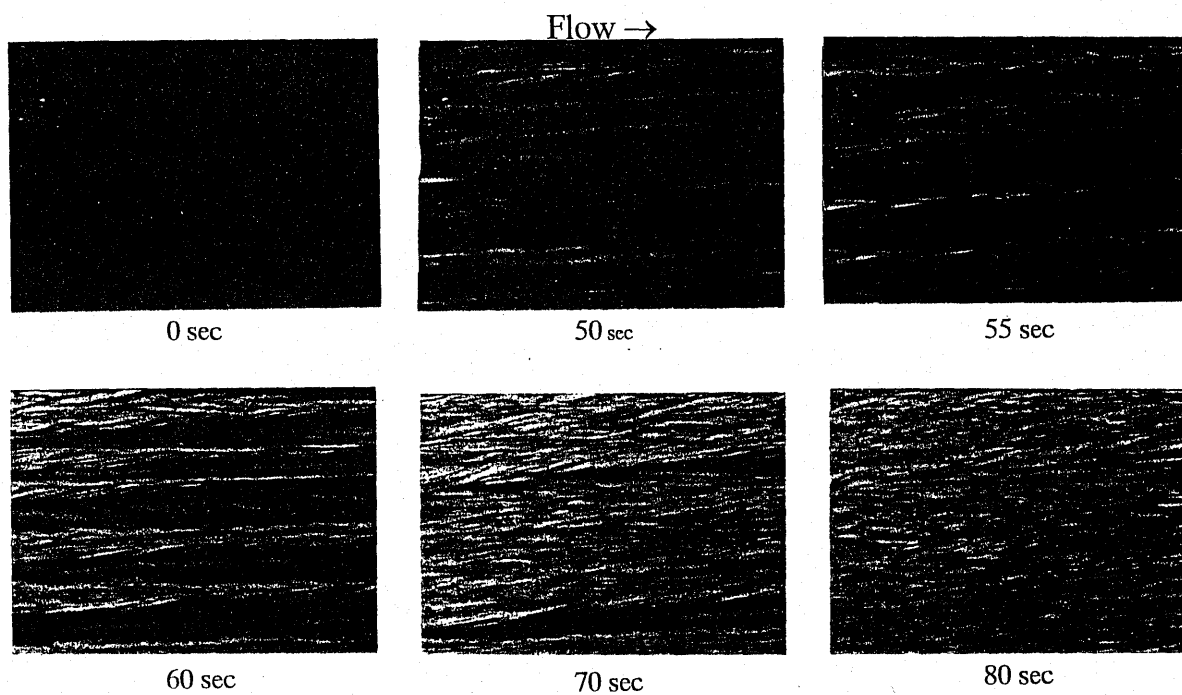


図 4.17 (c) ひずみ速度 420 (1/s) 電界強度 1.5kV/mm の場合の流動状態の変化

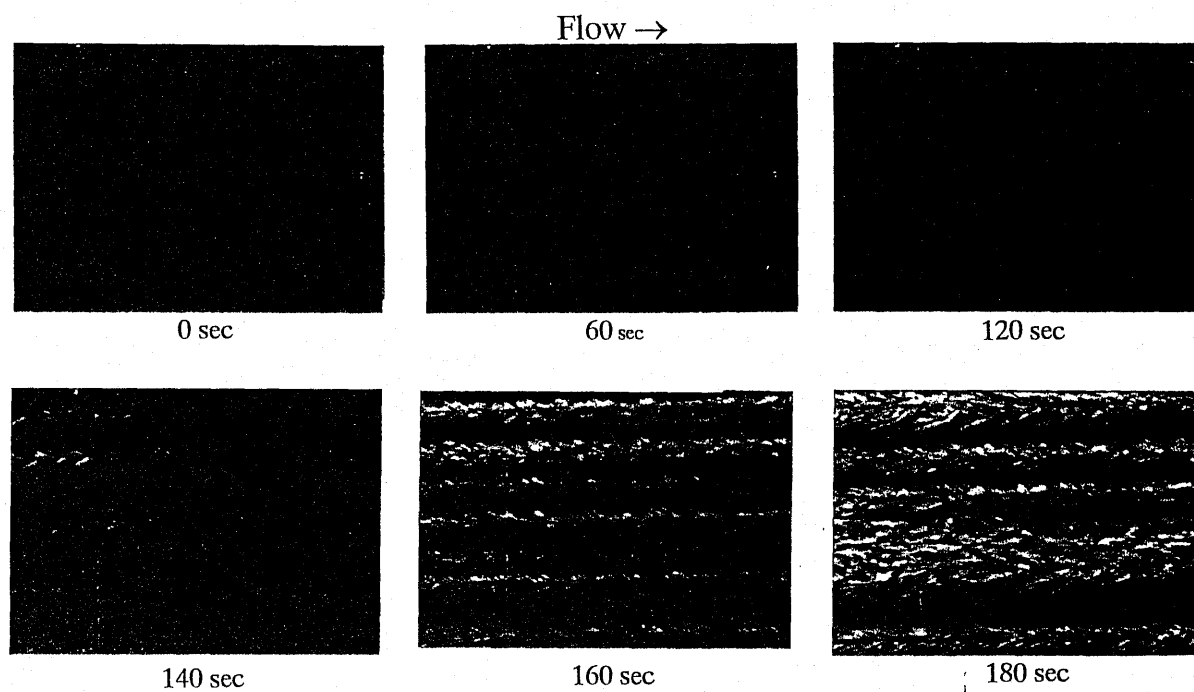


図 4.17 (d) ひずみ速度 200 (1/s) 電界強度 1.5kV/mm の場合の流動状態の変化

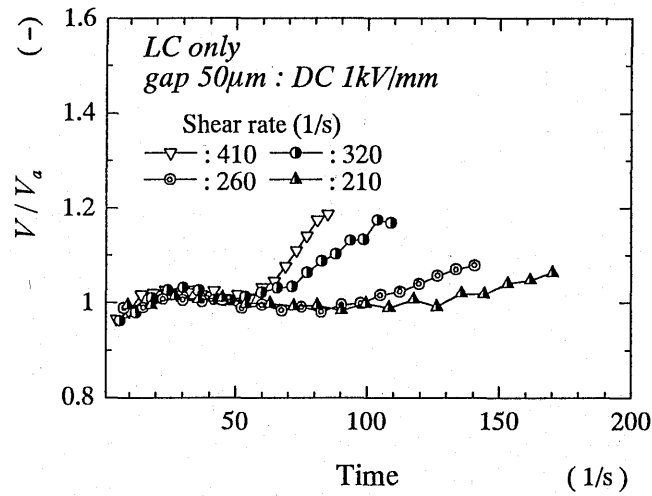


図 4.18 直流電圧 1kV/mm 印加時の流速の変化 (LC only)

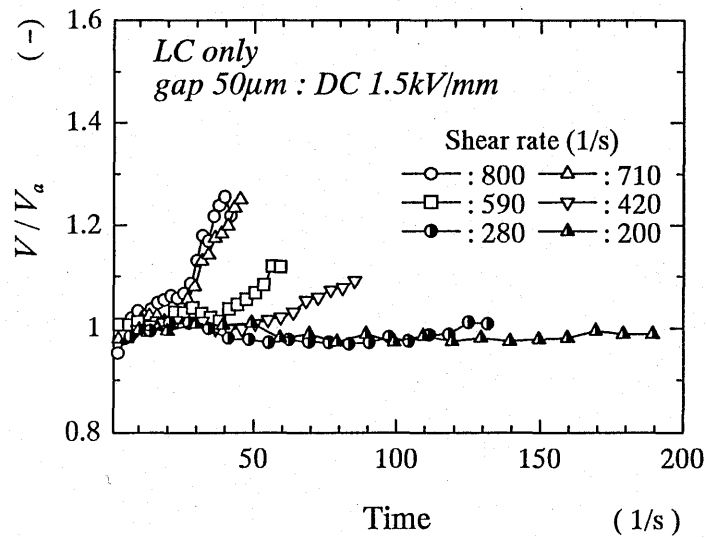


図 4.19 直流電圧 1.5kV/mm 印加時の流速の変化 (LC only)

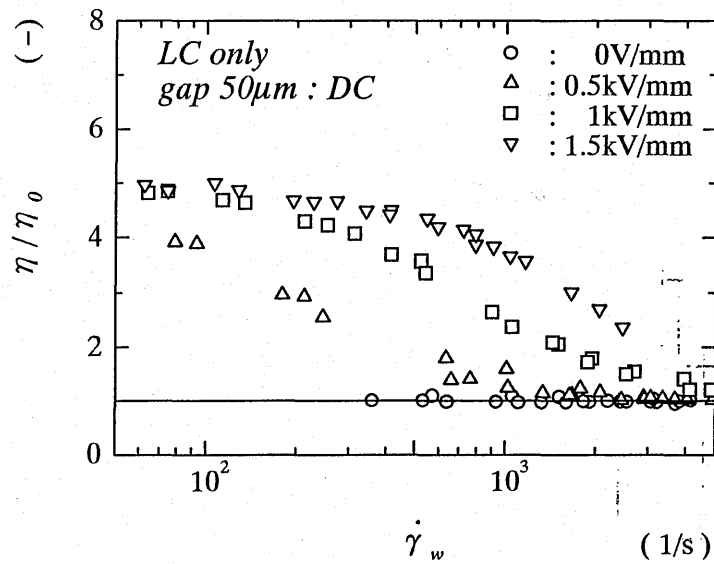


図 4.20 直流電圧印加時の粘度増加率 (LC only)

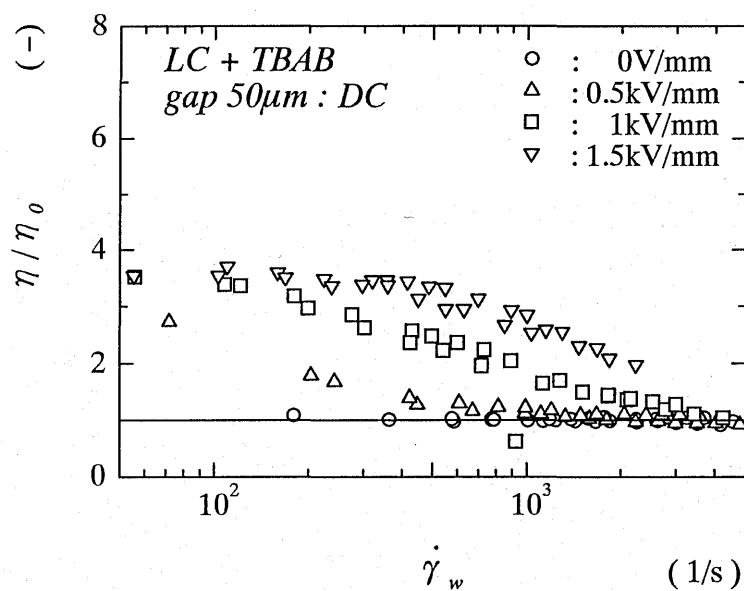
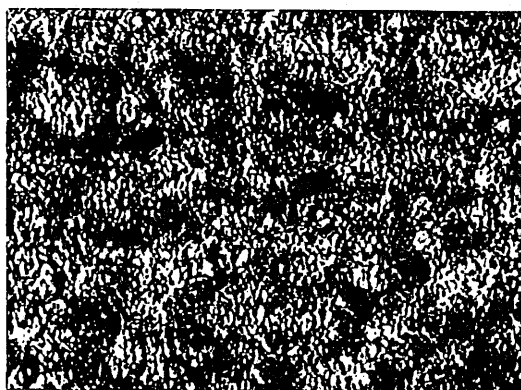
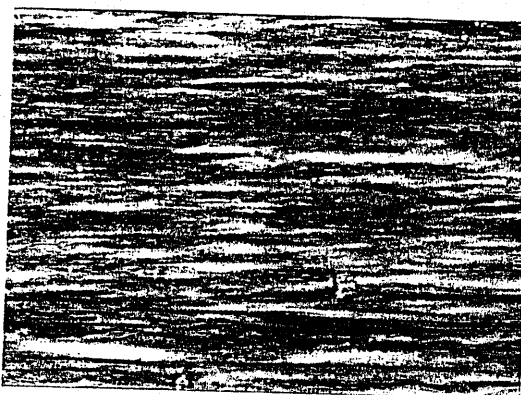


図 4.21 直流電圧印加時の粘度増加率 (LC+TBAB)



No flow



$\dot{\gamma}_w = 540$  (1/s)

図 4.22 LC+TBAB における偏光顕微鏡観察例 DC1.5kV/mm  
(1.4×1.0 mm)

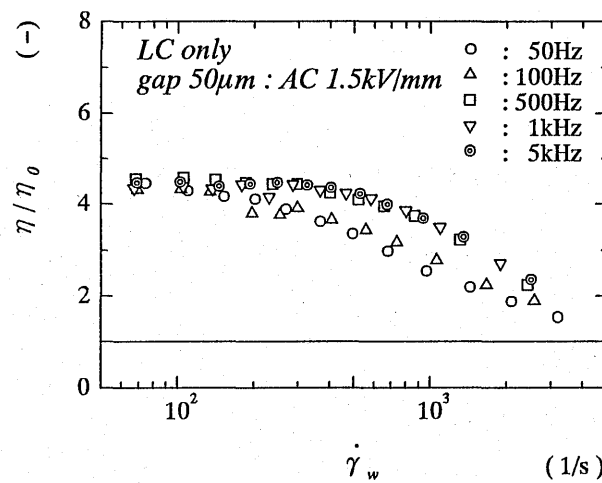


図 4.23 交流電圧 1.5kV/mm 印加時の粘度増加率の周波数依存性 (LC only)

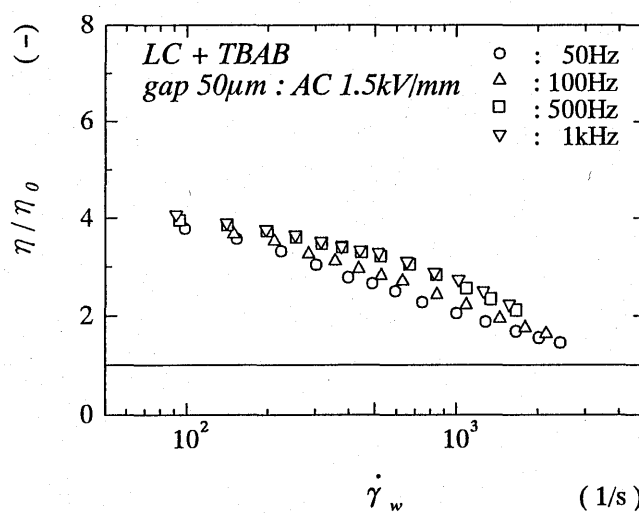
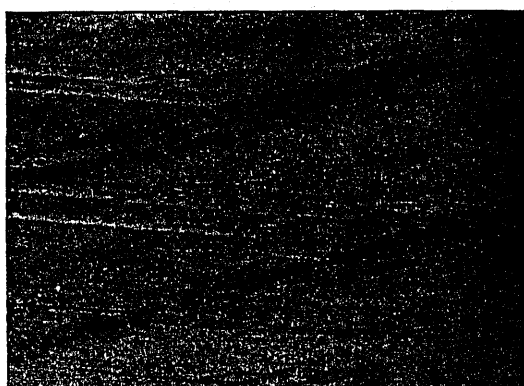


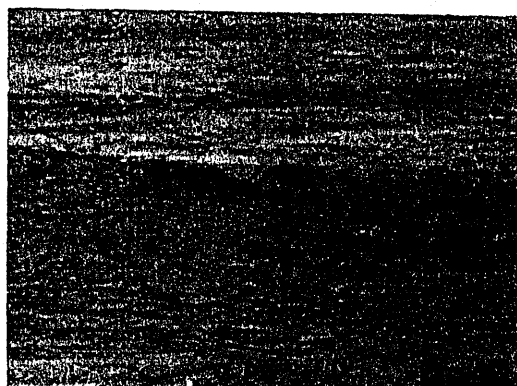
図 4.24 交流電圧 1.5kV/mm 印加時の粘度増加率の周波数依存性 (LC +TBAB)

Flow →



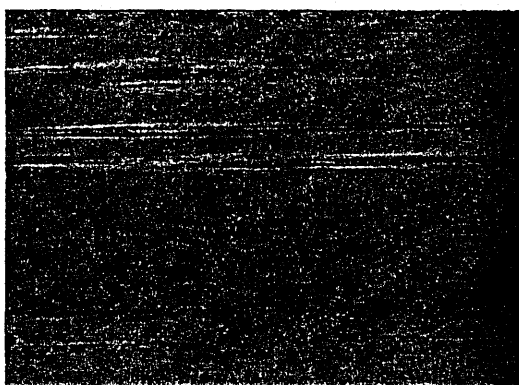
LC only AC 100Hz

$$\dot{\gamma}_w = 580$$



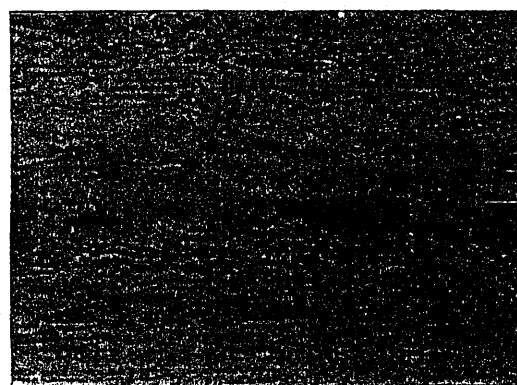
LC+TBAB AC 100Hz

$$\dot{\gamma}_w = 560$$



LC only AC 1kHz

$$\dot{\gamma}_w = 550$$



LC+TBAB AC 1kHz

$$\dot{\gamma}_w = 560$$

図 4.25 交流電圧印加時の流動状態の偏光顕微鏡観察例 ( LC only, LC+TBAB )

(1.4\*1.0mm)

#### 4.2.2 すきま $25\mu\text{m}$ の場合の実験結果

すきまが  $25\mu\text{m}$  の場合の直流電圧印加の場合の実験結果を図 4.26 に示す。電圧を印加することにより低ひずみ速度域で 5 倍程度まで粘度が増加した。 $50\mu\text{m}$  の場合と比較すると、同程度まで粘度が増加しているのがわかる。また全体的な傾向は  $50\mu\text{m}$  の流路の場合と変わらない。しかし本研究の実験の範囲内では  $50\mu\text{m}$  の流路の場合の様な配向状態から対流状態へ変化する様子は観察されなかった。

次に図 4.27 に交流電圧  $1.5\text{kV/mm}$  を印加した場合の周波数の影響を調べた結果を示す。 $50\mu\text{m}$  の流路と同様に周波数が  $500\text{Hz}$  以上ではそれ以上粘度が増加しなくなった。また  $50\mu\text{m}$  の場合の交流電圧印加の場合と比較すると同程度の粘度増加が得られた。

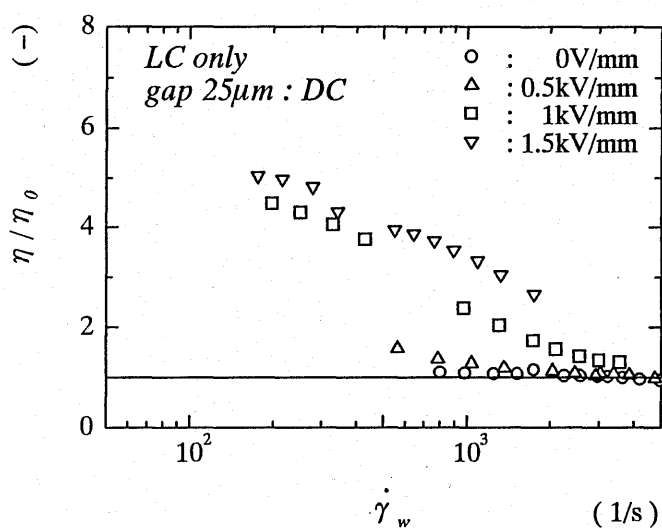


図 4.26  $25\mu\text{m}$  流路における直流電圧印加時の粘度増加率 (LC only, DC)

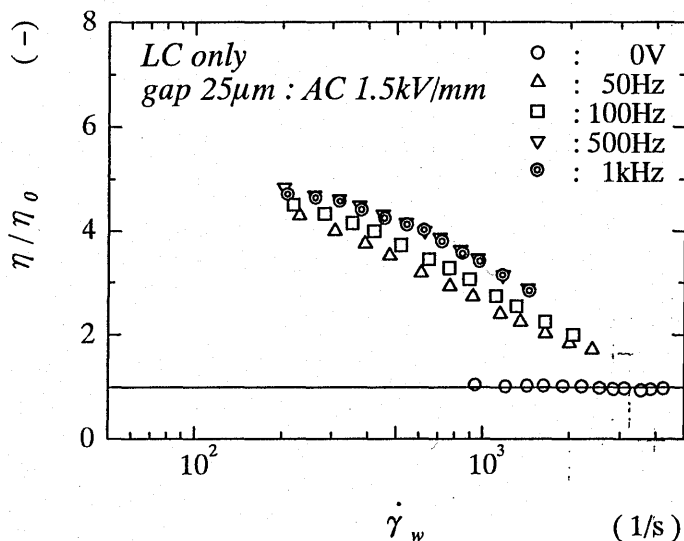


図 4.27  $25\mu\text{m}$  流路における交流電圧印加時の周波数依存性 (LC only, AC)

### 4.2.3 すきま $10\mu\text{m}$ の場合の実験結果

液晶の分子配向は壁面の状態によって影響されることが知られており<sup>(21)</sup>、この壁面の影響は、場合によっては壁面から  $10\sim 20\mu\text{m}$  程度まで及ぶと考えられている。そこで電極間のすきまが狭くなると、すきまによって影響を受け、液晶の ER 効果に変化が生ずることは十分に考えられる。このため電極間のすきまが  $10\mu\text{m}$  の流路を作成し液晶の ER 効果を検討した。以下にその実験結果を示す。

図 4.28 に LC only を用いた場合の直流電圧印加時の実験結果を示す。電圧を印加することによって低ひずみ速度域で 4 倍程度まで粘度が増加しているが、同じ電界強度で  $50\mu\text{m}$  流路の場合と比較すると若干低めの結果となっている。また、電界強度  $3\text{kV/mm}$  を印加したときでは、実験の範囲のひずみでは常に一定の粘度増加率を示した。なお、 $50\mu\text{m}$  流路の場合と異なりすべての場合において配向した状態で流動しており、対流状態に移行していく様子は観察されなかった。次に LC+TBAB の場合における直流電圧印加の結果を図 4.29 に示す。この場合には、 $50\mu\text{m}$  流路の場合と同様に対流が確認されているが、図 4.28 の場合と同様に同じ電界強度で  $50\mu\text{m}$  流路の場合と比較すると若干低めの結果となった。

次に LC only に対する交流電圧印加時の電界強度が  $1.5\text{kV/mm}$  の場合の実験結果を図 4.30 に示す。また LC+TBAB に対する同様な結果を図 4.31 に示す。どちらの場合も周波数が  $500\text{Hz}$  以上では、それ以上周波数が上がっても粘度が増加しなくなっており、すきま  $50\mu\text{m}$  流路の場合と同様の傾向が見られる。また直流電圧印加時と同様に低ひずみ速度域で 4 倍程度まで粘度が増加していることがわかる。

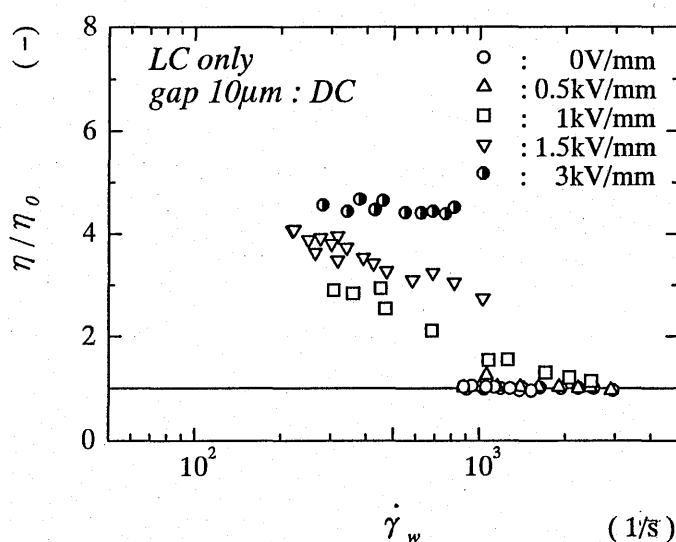


図 4.28 直流電圧印加時の粘度増加率 (LC only)

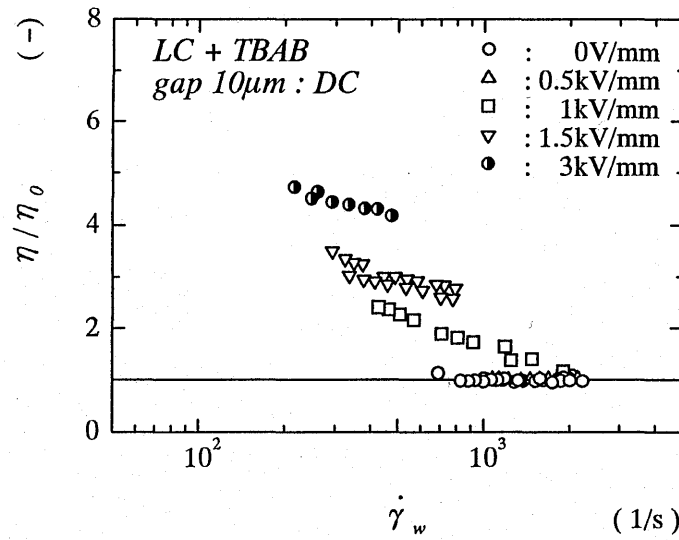


図 4.29 直流電圧印加時の粘度増加率 (LC+TBAB)

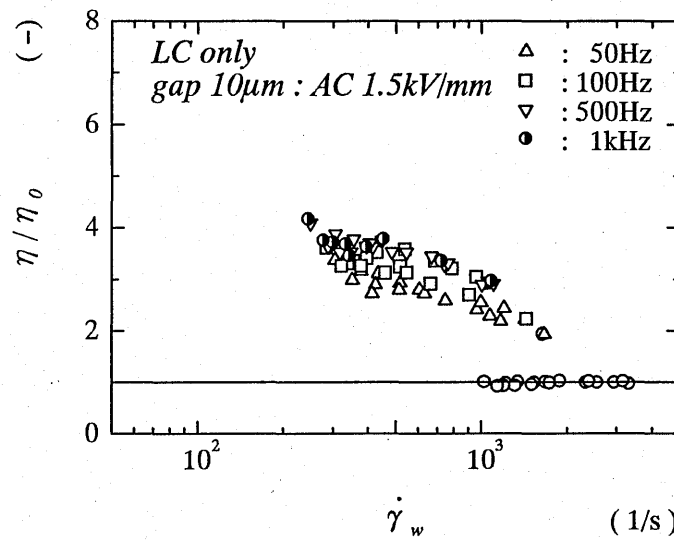


図 4.30 交流電圧 1.5kV/mm 印加時の周波数特性 (LC only)

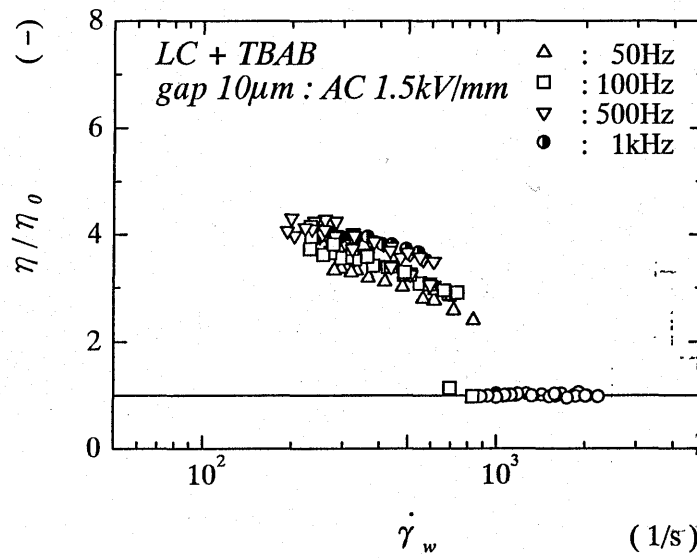


図 4.31 交流電圧 1.5kV/mm 印加時の周波数依存性 (LC+ TBAB)

#### 4.2.3 電圧印加時の応答性

実際の装置で ER 効果を応用する場合では、電圧を印加したときの粘度増加の応答性が重要になる。そこですきまが  $50\mu\text{m}$  の流路を用いて電圧印加時の平均流速の変化を測定した。以下に電圧印加に対する液晶の粘度増加の応答性について調べた結果を示す。実験では  $50\mu\text{m}$  の流路を流れるときのガラス管内の試料の移動の様子を高速度ビデオカメラで拡大して撮影し、電圧を印加する前後の流速を算出した。撮影条件はシャッタースピード  $1/500$  (s)、撮影間隔  $1/500$  (s)で行った。なお、この実験で求められた電圧印加時の応答は、液晶だけのものではなく、実験装置全体での応答である点に注意を要する。なお電圧で、直流  $1.5\text{kV/mm}$ 、または交流  $1.5\text{kV/mm}$  で周波数が  $100\text{Hz}$ 、 $1\text{kHz}$  の場合の実験を行った。図 4.32 に電圧の印加方法を示す。時間が 0 より前の部分では電圧は印加されず、時間が 0 の点でステップ状に設定した電圧が印加される。

まず LC only の場合の実験結果について示す。図 4.33 は、電圧印加前のひずみ速度が  $2900$  ( $1/\text{s}$ ) の場合の結果である。図の横軸は、縦軸はある時刻での電極間での平均流速  $V_a$  を、電圧を印加する前の平均流速  $V_m$  で割った流速の変化率である。どの電圧条件の時でも電圧を印加後約  $0.05$  s 程度で速度が変化していることがわかる。また図 4.34、図 4.35、図 4.36 は、電圧印加前のひずみ速度が  $1600$ 、 $1300$ 、 $800$  の場合の結果である。これらの実験結果の間に応答速度に大きな差は見られず、やはり  $0.05\text{sec}$  程度で流速の変化が

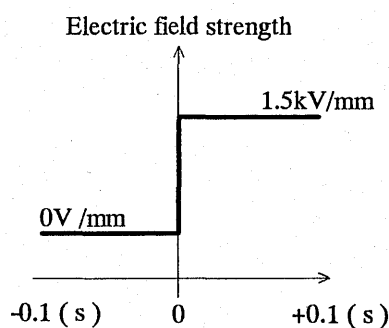


図 4.32 電圧印加の模式図

完了しているのがわかる。図 4.37 に電圧を印加した直後の偏光顕微鏡写真を示す。これは通常のビデオ録画であるのでシャッタースピードが  $1/30\text{sec}$  と遅い。また電圧を印加した時刻がビデオに入力できないためビデオ画面上で変化が見られたところを電圧を印加した点であるとした。まず尋常電圧印加時では、電圧印加直後では、流れは乱れた状態であるが、電圧印加後  $3/30$  程度で液晶の配向が安定していることが確認できた。同様に交流電圧  $1\text{kHz}$  を印加したときでは、 $3/30$  秒程度で完全に配向した流れに変化していた。このように直流、交流ともに  $3/30$  程度で配向状態に変化したために、速度応答において応答時間に差が生じなかったと考えられる。

次に LC+TBAB の場合での応答速度の測定結果を示す。図 4.38、図 4.39 は電圧印加前のひずみ速度が  $1800$  ( $1/\text{s}$ )、 $1300$  ( $1/\text{s}$ ) の場合の結果である。この場合も先ほどの LC+TBAB の場合と同様に  $0.05$  秒程度で流速が変化してことがわかる。また図 4.40 に LC+TBAB の場合の直流電圧印加の場合の偏光顕微鏡観察例を示す。この場合でも交流電圧印加時では LC only の場合と同様に  $3/30$  秒程度で配向が完了している。しかし直流電圧印加時でも電圧印加直後では、対流状の流れは観察されず配向状態であると考えられる。このため LC only と LC+TBAB の直流電圧印加の場合に差が生じなかったと考えられる。

以上の結果より本研究の範囲では LC only、LC+TBAB の間に応答速度に差は見られず  $0.05\text{sec}$  程度で流速が変化する事がわかった。また直流電圧印加、交流電圧印加の場合にも応答速度に差は生じなかった。

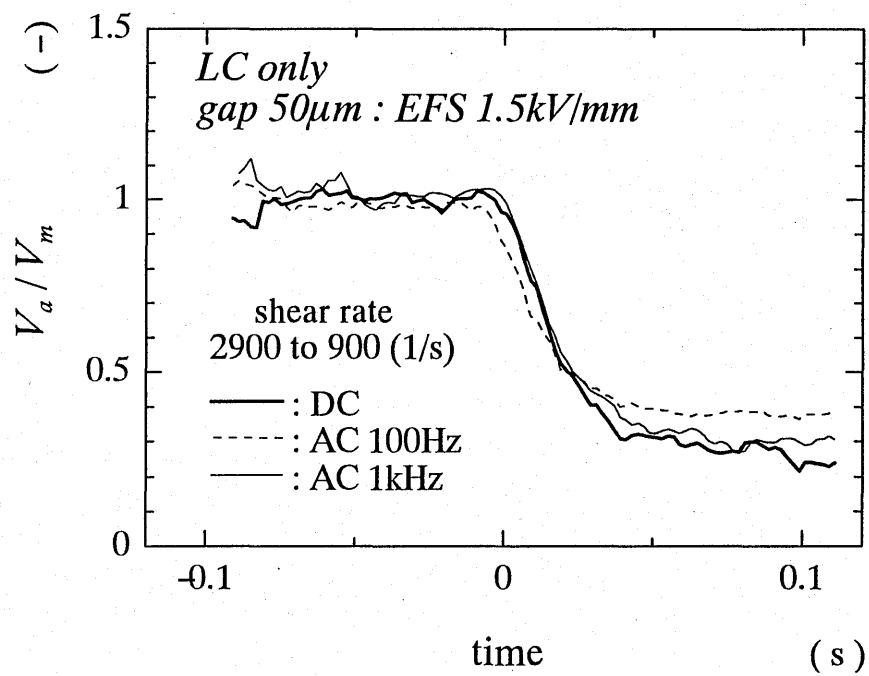


図 4.33 電圧印加時の流速の変化 (LC only)

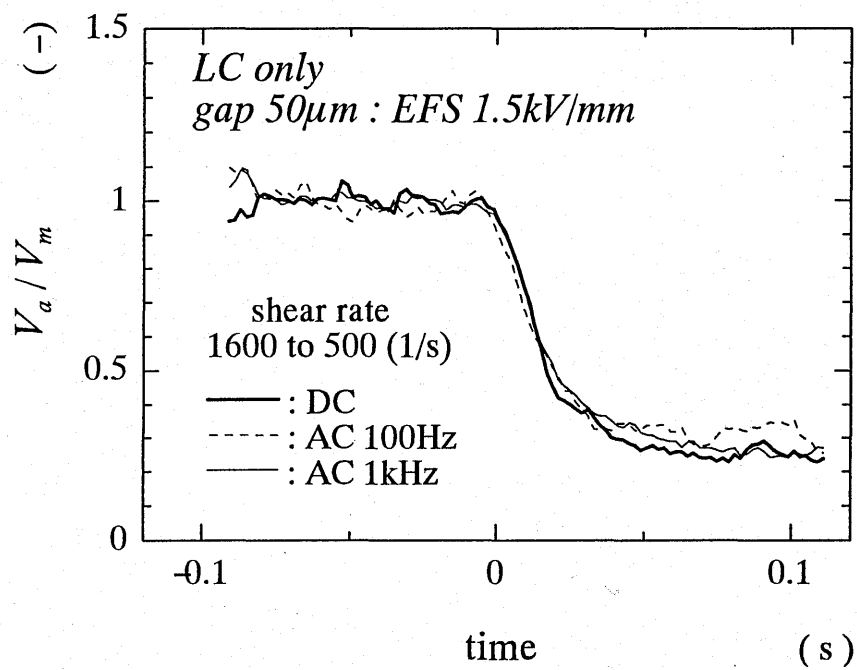


図 4.34 電圧印加時の流速の変化 (LC only)

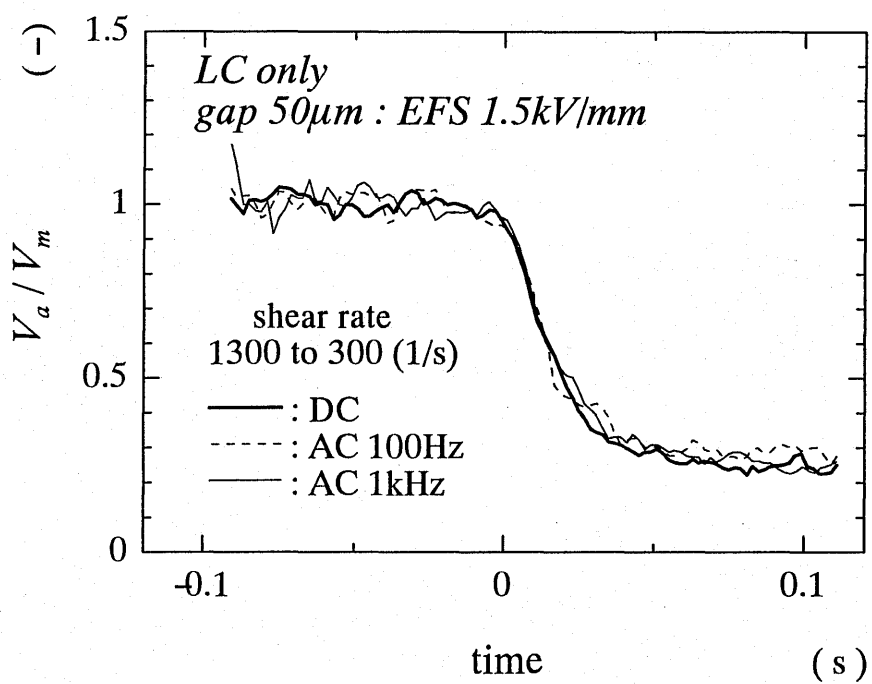


図 4.35 電圧印加時の流速の変化 (LC only)

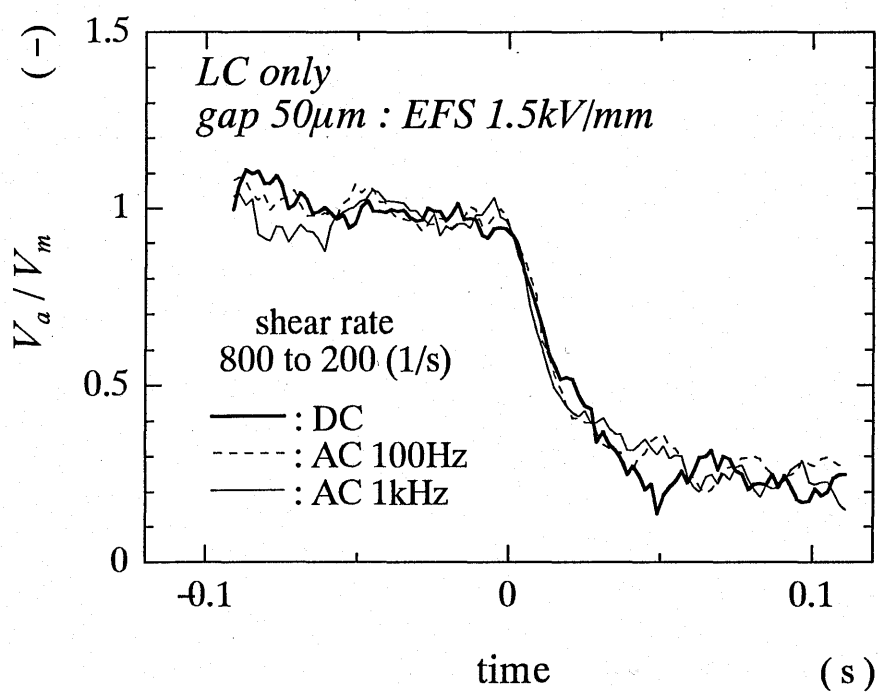


図 4.36 電圧印加時の流速の変化 (LC only)

LC only : Flow →



1/30 sec  
DC 1.5kV/mm



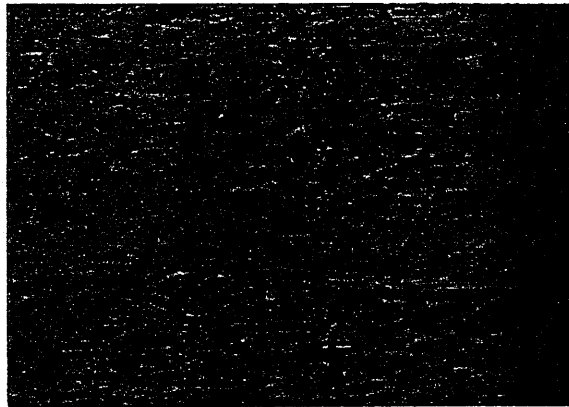
3/30 sec



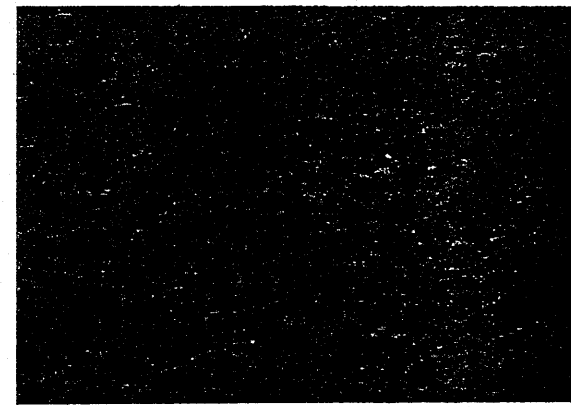
5/30 sec



1/30 sec  
AC 1kHz 1.5kV/mm



3/30 sec



5/30 sec

図 4.37 ひずみ速度 550 (1/s) 電界強度 1.5kV/mm の場合の電圧印加直後の流動状態の変化 (LC only)

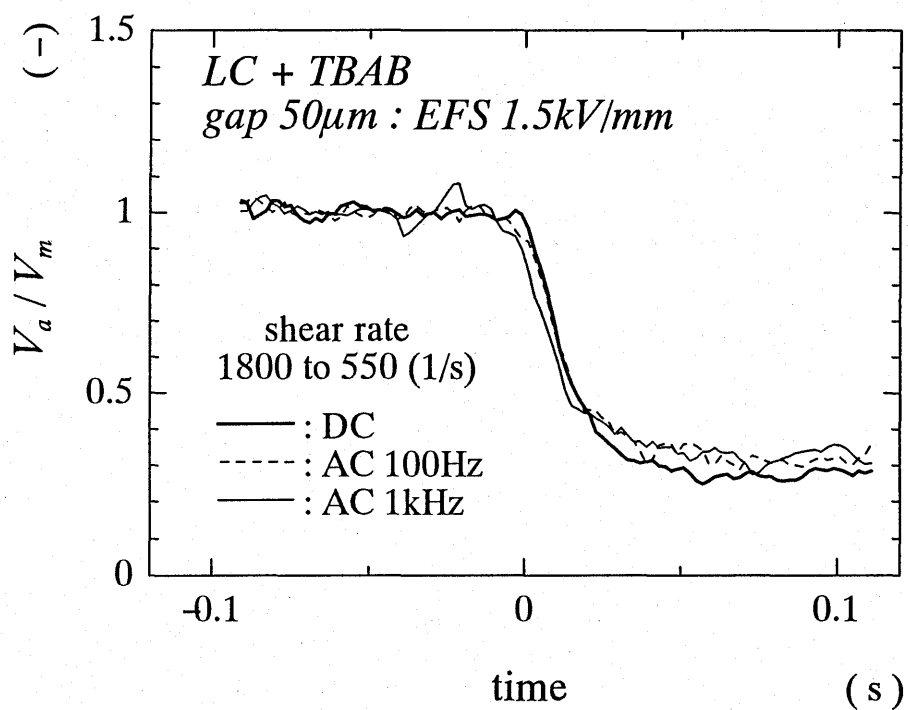


図 4.38 電圧印加時の流速の変化 (LC+TBAB)

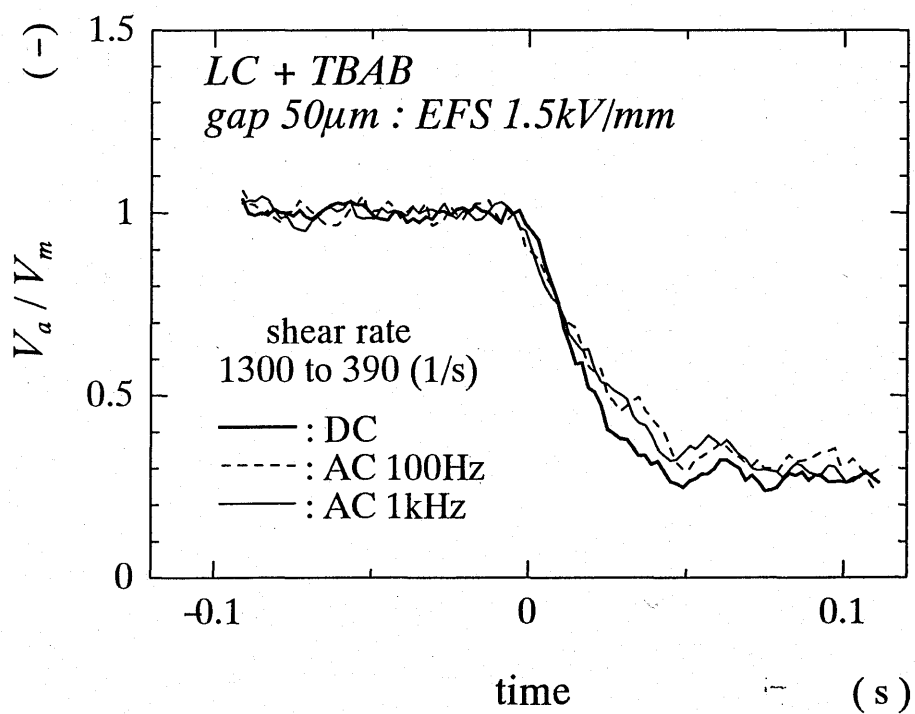
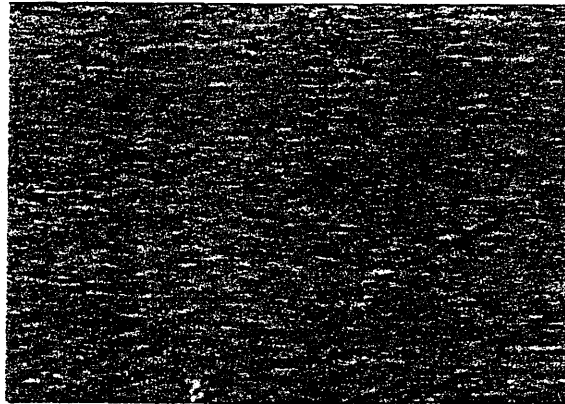
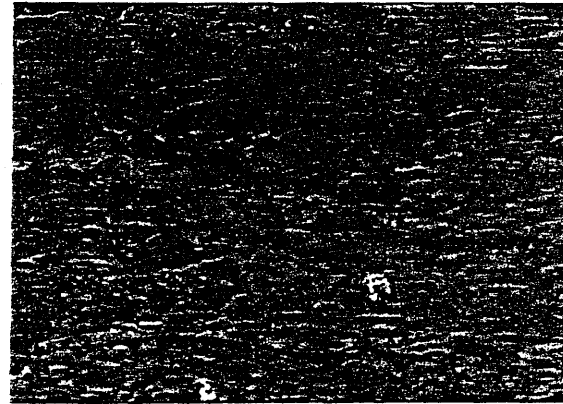


図 4.39 電圧印加時の流速の変化 (LC +TBAB)

LC+TBAB : Flow →



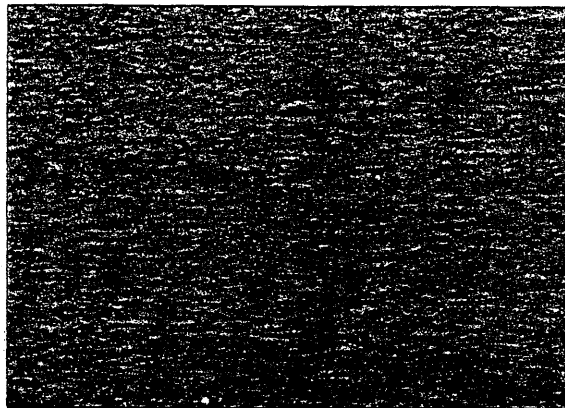
1/30 sec  
DC 1.5kV/mm



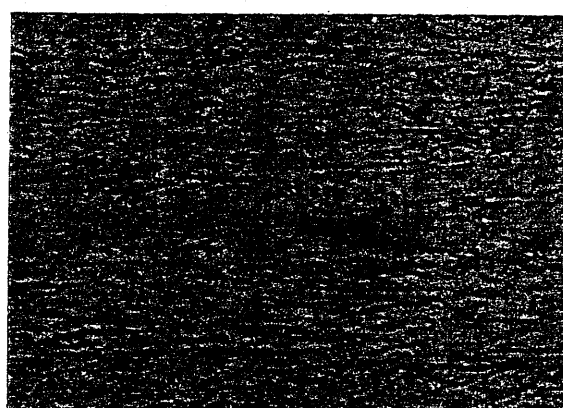
3/30 sec



5/30 sec



1/30 sec  
AC 1kHz 1.5kV/mm



3/30 sec



5/30 sec

図 4.40 ひずみ速度 550 (1/s) 電界強度 1.5kV/mm の場合の電圧印加直後の流動状態の変化

## 第5章 考察

本章では第4章で得られた実験結果より液晶の ER 効果についてその発生機構、誘電異方性による影響、その応答性、すきまによる影響、流動場の影響について検討を行う。

### 5.1 電気粘性効果の発生機構

この節では液晶の流動状態と粘度変化に関する考察を行い、ER 効果の発生機構を明らかにする。考察には 50 $\mu\text{m}$  の場合の実験結果を用いた。

#### 5.1.1 誘電異方性が負の場合

まず誘電異方性が負の液晶の電気粘性効果の発生機構に関して検討する。誘電異方性が負の場合では偏光顕微鏡観察によって直流、交流電圧印加のどちらの場合でも液晶が対流を起こす様子が観察された。直流の場合では MBBA、MBBA+TBAB のどちらの試料でも ER 効果に差は生じなかったが、TBAB を添加した試料では実験終了後の試料が褐色に変色しているのが観察された。TBAB は有機電解質系の導電性ドーパントであり、TBAB を含んだ液晶は交流電圧印加時には化学的に安定であるが直流印加時には不安定であることが知られている<sup>(17)</sup>。本実験においても直流電圧印加時に電極で液晶が電気分解され劣化し、その結果褐色に変色したと考えられる。逆に交流電圧印加の場合では TBAB が交流電圧印加時の電極反応に関与するため液晶の劣化が押さえられる。そのため長時間 ER 効果を発揮させるには、目的にあわせたドーパントを用いる必要があると考えられる。

次に電界強度が 1.5kV/mm の場合の DS モードのしきい値周波数  $f_c$  を表 5.1 に示す。すなわち、電界強度が一定の場合このしきい値周波数より印加電圧の周波数が高くなると DS モードが消失し、対流が観察されなくなる。図 5.1 に周波数に対する粘度増加率の変化を MBBA と MBBA+TBAB で比較した図を示す。図から周波数が  $f_c$  を越えると粘度が増加しなくなっていることが確認される。よって、この点からも誘電異方性が負の液晶に対する ER 効果は DS モードによって対流が発生し、流動抵抗が増加したために生じていることがわかる。ここで第1章で述べた笹田らの2次元流路型粘度計である津田式粘度計を用いた MBBA の実験<sup>(2)</sup>と本実験の結果を比較する。笹田らは、直流電圧印加時では、すきまが 200 $\mu\text{m}$  の流路において電界強度 1.5kV/mm で約 2 倍の粘度増加を観測している。これは本研究でも電界強度 1.5kV/mm の場合では同程度の粘度増加率を示している。しかし交流電圧印加時には、笹田らの結果では、電界強度が 3kV/mm 以下ではほとんど粘度が増加していないのに対して、本研究では遙かに低い電界強度 1.5kV/mm で約 2 倍の粘度増加が起こっている。また交流の周波数の影響では本研究の方が高い周波数まで粘度が増加している。すなわち笹田らの場合では、高周波を印加すると粘度増加を示さなくなっているが、本研究の場合では MBBA の場合、高周波数であっても若干の粘度増加が観測された。一方、MBBA+TBAB の場合では笹田らと同様に、高周波数での粘度増加は起こらなかった。

この様な笹田らの実験結果との違いに関しては、すきまによる影響と考えられる。どちらの実験でも MBBA による粘度増加は液晶の対流発生によるものであり、この対流の大きさ、パターンの変化はすきまに依存する。このため同じ周波数、電界強度であっても異なった対流状態が生じたため ER 効果にも影響が現れたものと考えられる。笹田らが行っていない MBBA にドーパントを添加して液晶の比抵抗を変化させた場合の ER 効果が、MBBA のみの場合と異なった点についても、同様に対流の構造の違いによるものと考えられる。しかし映像的な違いは観察されなかった。

表 5.1 誘電異方性が負の液晶に対するしきい値周波数  $f_c$  の測定結果

sample	$f_c$ (1.5kV/mm)
MBBA	1kHz
MBBA+TBAB	3kHz

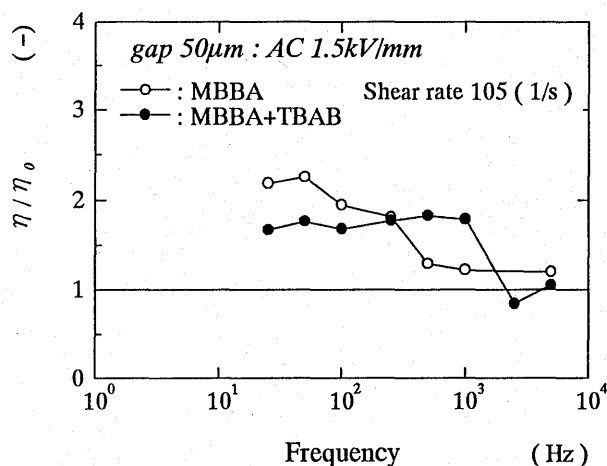


図 5.1 誘電異方性が負の試料に対する粘度増加率の周波数依存性の比較

### 5.1.2 誘電異方性が正の場合

誘電異方性が正の液晶に対しては、直流電圧印加時における偏光顕微鏡観察によって混合液晶のみ (LC only) の場合では、一様に配向した状態が観察され、TBAB を添加した場合には対流状態が観察された。そのため ER 効果も配向状態で起こる場合と、対流状態で起こる場合が考えられる。ところで  $50\mu\text{m}$  流路において電界強度  $1\text{kV/mm}$  の場合にはひずみ速度  $600$  以下、 $1.5\text{kV/mm}$  の場合には  $1500$  以下で電圧印加直後に配向状態で流動する様子が観察された。しかし配向状態であっても時間とともに流れが乱れ始め、対流状態へ変化していくのが観察された。そこで配向状態から対流状態へ変化していくときの粘度の変化を図 5.2 に示す。この図において縦軸は配向時に算出される粘度を  $1$  としたときの、対流状態へ変化した後の粘度を表している。また図中の横軸はひずみ速度であるが、流動状態が変化するに従って流速が早くなるため (第 4 章)、ひずみ速度は配向状態での流速より算出したものを用いて整理してある。電界強度が大きい方が、またひずみ速度が低い方が流動状態が変化した後の粘度の減少量が少ない結果となっている。これは以下のように考えられる。対流による流動抵抗の変化は、主流の強さと 2 次流となる対流の強さにより決まると考えられる。電界強度が大きい場合には強い対流が生じ、一方電界強度が一定の場合においてひずみ速度が低い場合には対流の強さに対して主流の強さが弱まるために相対的に粘度が高くなると思われる。図中においてもひずみ速度が小さくなるにつれ、配向時と同程度の粘度増加を示すことがわかる。逆にひずみ速度が大きくなると、それに伴って主流方向の力が大きくなるためこの主流方向の力が対流による流動抵抗よりも遙かに大きくなるため、粘度が増加しないと考えられる。

また、図 5.3 に平行平板型 2 次元流路の場合の LC only と LC+TBAB の直流電圧印加の場合の比

較した結果を示す。ここで LC only の場合では、配向状態の場合である。これらの結果より、TBAB を添加し対流を起こさせたことによって粘度増加が、配向時の 8 割程度しか起こらない場合があることがわかる。しかし LC only の場合でも、試料が劣化するに従って電圧を印加した直後でも配向が観察されず、対流状態を示すようになった。それに伴い高ひずみ速度域で粘度増加が起こらなくなった。

図 5.4 に平行円板型回転粘度計の場合の同様な実験結果を示す。なお、この場合、それぞれの実験での結果には十分な差があるため、すきまの誤差の影響は考慮に入れる必要はないと考えられる。この図で、LC only の場合は分子配向によって ER 効果が生じていると考えられる。可視化での確認はできないが、時間的にはその値に変化が見られず、配向状態が長時間保たれているようである。これは平板が金属製であり、研削により表面がラビングされた効果が生じ、配向が安定したものと考えられる。この場合も、配向状態 (LC only) の方が、対流状態 (LC+TBAB) の粘度増加よりも大きいことがわかる。なお、この場合の LC only についても試料が劣化するにつれて、高ひずみ速度域での粘度増加率が下がり、グラフの曲線が左へずれていくような傾向があった。以上のことから直流電圧印加の場合、液晶の劣化や純度によって ER 効果の発生機構が変化し、粘度の増加割合の特性も変化することになる。このため、実際の装置を設計する際にはこれらの点に注意しなければならない。

一方、交流印加では静止時、流動時ともに一様に配向した状態が観察された。図 5.5 に交流電圧印加時の LC only と LC+TBAB の結果を比較した結果を示す。図に示すように LC only と LC+TBAB の両者の試料の間で差は見られない。以上の結果より誘電異方性が正の液晶では、交流電圧印加時には液晶の状態によらず配向によって ER 効果が生じ、安定した ER 効果が得られることがわかった。

最後にこれまで見られた 3 種の状態、すなわち、直流電圧印加時の配向、対流による ER 効果と交流電圧印加時の配向による ER 効果の比較を行う。図 5.6 に直流電圧の配向状態 (LC only) と対流状態 (LC+TBAB) を実線と破線で示し、交流電圧印加時の配向状態 (LC only, LC+TBAB) の場合の結果を記号で示す。図から直流電圧の対流状態の粘度増加よりも配向状態の粘度増加の方が大きいことが、交流の配向状態は直流の配向状態に近い粘度増加を示していることがわかる。以上のことから液晶の ER 効果の発生機構を表 5.2 のようにまとめることができる。表中の Convection は対流によって ER 効果が生じることを表し、Alignment (Align.) は配向によって ER 効果が生じることを示す。また ER 効果の発生機構に対する評価を表 5.3 に示す。総括すれば、直流電圧印加時の配向によって生ずる ER 効果がもっとも大きいことが、この配向状態は時間とともに乱れて対流状態に移行して粘度増加が低下するため安定性に欠ける。また液晶の純度や劣化によっても対流が発生するが、対流状態では十分な粘度増加は期待できない。一方、交流電圧を印加して液晶を配向させると直流電圧の配向とほぼ同程度の粘度増加率を示し、これは液晶の純度や劣化に対しても安定した粘度増加が期待できることが確認された。

表 5.2 液晶の ER 効果の発生機構の分類

	$\Delta\epsilon$	DC	AC
MBBA	$\Delta\epsilon < 0$	DS mode ( convection )	DS mode ( convection )
MBBA+TBAB	$\Delta\epsilon < 0$	DS mode ( convection )	DS mode ( convection )
LC only	$\Delta\epsilon > 0$	Align. $\rightarrow$ Convection	Alignment
LC +TBAB	$\Delta\epsilon > 0$	Convection	Alignment

表 5.3 ER 効果の発生機構に対する粘度増加の評価

	Stability	ER effect
DC ( Alignment )	$\triangle$	$\odot$
DC ( Convection )	$\circ$	$\triangle$
AC ( Alignment )	$\odot$	$\circ$

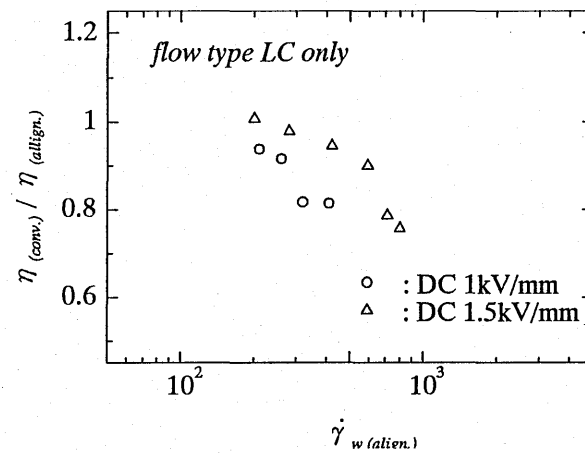


図 5.2 配向状態から対流状態へ変化したときの粘度増加の差

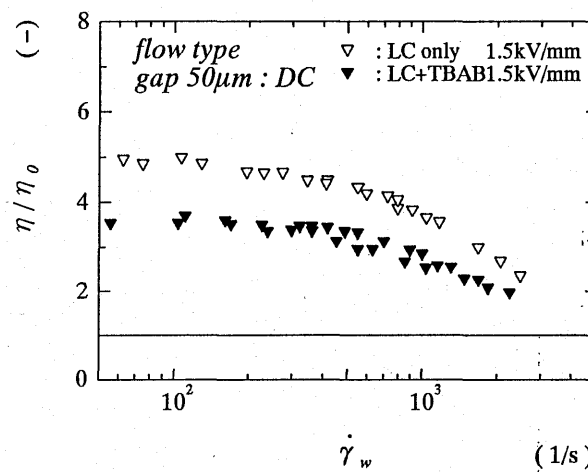


図 5.3 配向状態と対流状態の ER 効果の差 (平行平板型二次元流路)

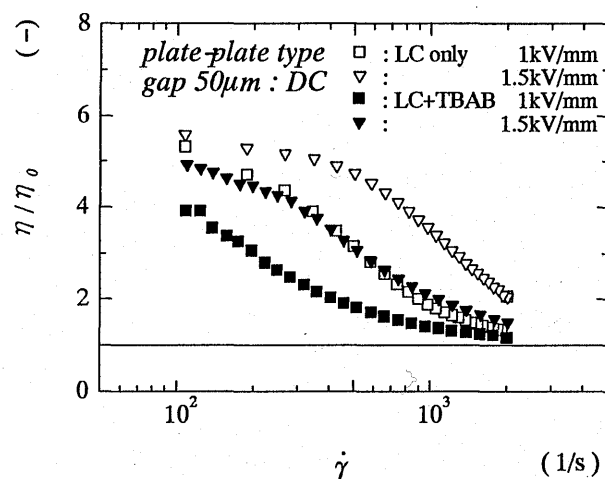


図 5.4 配向状態と対流状態の ER 効果の差 (平行円板型回転粘度計)

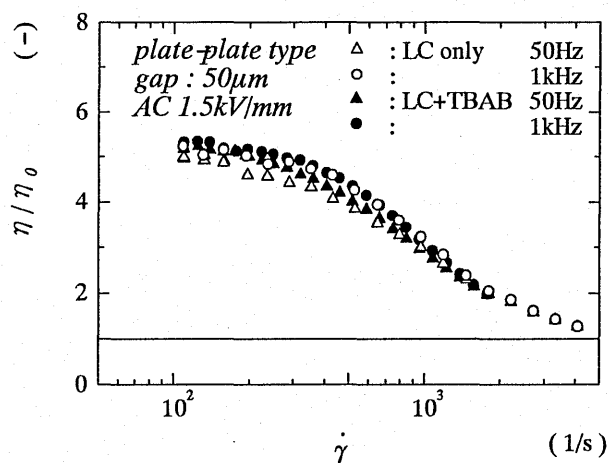


図 5.5 交流電圧印加時の LC only と LC+TBAB の場合の比較 (平行円板型回転粘度計)

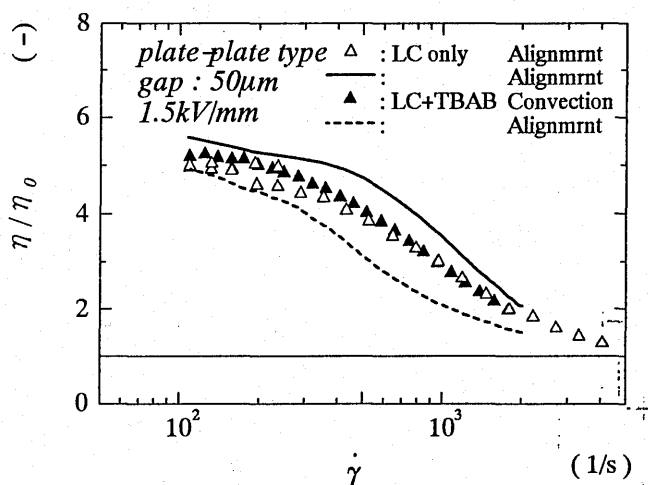


図 5.6 交流電圧印加時と直流電圧印加時の比較 (平行円板型回転粘度計)

## 5.2 誘電異方性の影響

図 5.6 に直流電圧印加時の誘電異方性が負と正の場合の結果を比較したものを示す。直流電圧印加時には、誘電異方性が負の液晶(MBBA, MBBA+TBAB)については、粘度増加割合は最大で 2 倍程度であったのに対して、誘電異方性が正の液晶(LC only)の場合では最大 5 倍程度の粘度増加を示した。また対流状態での ER 効果(LC+TBAB)の場合でも MBBA の場合より ER 効果は大きいことがわかる。

以上のことより狭いすきまにおいても誘電異方性が正の液晶の方が大きな ER 効果が期待できることが確認された。

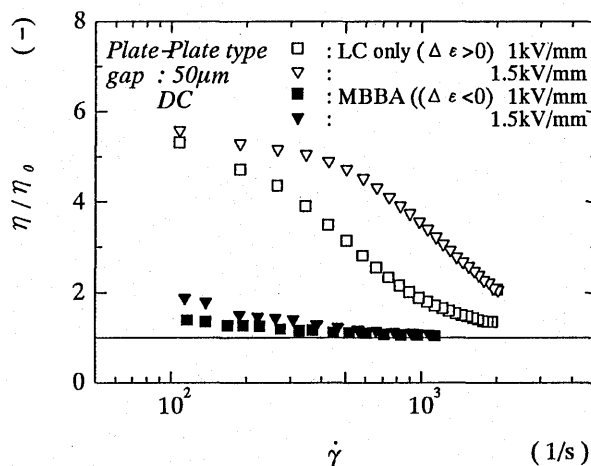


図 5.7 誘電異方性の正負による ER 効果の比較

## 5.3 電圧印加時の応答性

ネマティック液晶の電圧印加時の光学的な効果は、液晶ディスプレイの応用面からよく研究されている。その中で液晶の分子軸の向きを制御する TN (Twist Nematic) 効果の場合では、応答時間が 20~80 (msec) 程度とされており、また液晶の対流を利用する DS 効果の場合の応答速度は 10~50 (msec) とされている<sup>(17)</sup>。これらの光学的な応答は、液晶の分子が配向したり、対流が発生するするのに必要な時間である。これらの代表的な電気光学効果の応答速度を表 5.3 に示す。そこでこれらの値と本研究で測定した粘度増加の応答速度と比較する。本研究で得られた応答速度は、配向の場合では 50msec 程度であり、対流の場合でも 50msec 程度であった。この値は一般的な TN 効果、DS 効果の場合の光学的な応答速度と同程度の応答速度であることがわかる。すなわち液晶の ER 効果は、光学的な応答時間が判れば、その時間と概ね同程度の応答が期待してもよいと考えられる。ただし光学的応答がこれ以上早い場合では、そのまま応答時間が適用できるとは考えがたく、流動抵抗の応答の確認が必要であると考えられる。

ここで光学的な応答時間を早くするためには誘電異方性を大きくする、粘性率、弾性率を小さくするなどの方法が考えられるが、ER 効果の場合では粘性率は ER 効果に直接に関係するため、必要とされる性能にあわせた液晶の開発が必要であると思われる。

表 5.3 液晶の電気光学効果と応答時間 (17)

電気光学効果	機構	$\Delta\epsilon$	立ち上がり時間	立ち下がり時間
TN 効果	分子軸の配向を制御	正	20~80 ( msec )	60~150 ( msec )
DS 効果	液晶の対流を用いる	負	10~50 ( msec )	30~150 ( msec )

#### 5.4 すきまの大きさによる影響

平行平板型 2 次元流路の場合の実験結果を用いて、すきまの大きさが ER 効果に与える影響について検討する。図 5.8 に直流電圧印加時の LC only の場合、すなわち配向状態における結果を示す。すきまが  $50\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$  の場合では粘度増加量の差は生じなかった。しかし、すきまが  $10\mu\text{m}$  の場合では、ひずみ速度が同程度の場合、 $50\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$  より粘度の増加量が小さくなっている。液晶の配向は、電極との界面の影響を強く受けることが知られており、本研究の場合ではガラス電極面で水平配向状態であると考えられる。この界面の影響により、図 5.9 に示すように電圧を印加しても垂直に配向できない分子の層が存在し、この層の影響によって粘度増加が小さくなったと考えられる。ここですきま  $10\mu\text{m}$ 、電界強度を  $3\text{kV/mm}$  に上げた場合の結果と比較してみると、 $50\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$  の電界強度  $1.5\text{kV/mm}$  の場合と同程度の粘度増加を示し、この点より電界強度を上げればこの壁面の影響を少なくできることがわかる。ところでひずみ速度が極めて遅い場合では、電界強度によらずほぼ一定の粘度増加が得られており、 $10\mu\text{m}$ 、 $1.5\text{kV/mm}$  の場合でもこのような場合では、すきまの大きい場合と同様の粘度増加を生じると推測される。

次に図 5.10 に LC+TBAB すなわち対流状態での粘度増加について示す。同程度のひずみ速度の範囲ではすきまによって粘度増加の差は生じていない。対流によって粘度増加が起こる場合では、壁面の影響をが少ないことがわかる。

図 5.11 に交流電圧印加時のすきまの影響を調べた結果を示す。図中の  $50\mu\text{m}$  の場合の結果において LC only と LC+TBAB の場合では、粘度増加に差が生じているが、回転円板型粘度計での測定においてそれぞれの試料の間に差は生じなかった。図中の  $50\mu\text{m}$ 、LC+TBAB の場合粘度増加が低いのはすきまの影響ではなく他の何らかの原因、たとえば TBAB 以外の不純物の混入や液晶の劣化の可能性が考えられ、その結果、粘度増加が小さくなったと考えられる。この結果以外では、交流電圧印加により、 $50\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$  の場合では粘度増加に差は見られないのに対し、 $10\mu\text{m}$  の場合では LC only の場合でも粘度増加が低くなっている。

交流の配向状態においても、先ほどの直流電圧印加の配向状態での結果と同様な理由によって壁面の影響を受け、粘度増加が低くなったと考えられる。

以上の結果より、配向状態で粘度増加を起こす場合、ひずみ速度によってはすきまがある程度狭くなると粘度増加が低くなることが確認された。

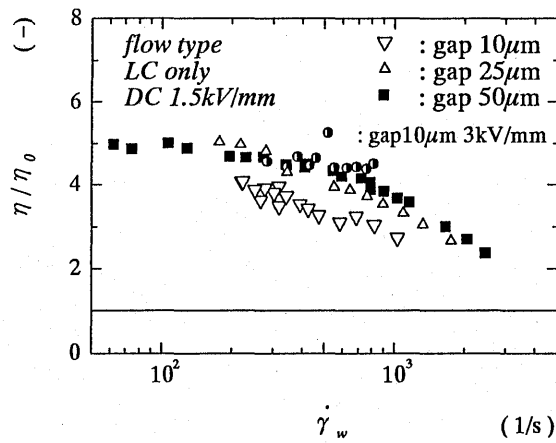


図 5.8 すきまの大きさによる影響 (LC only, DC)

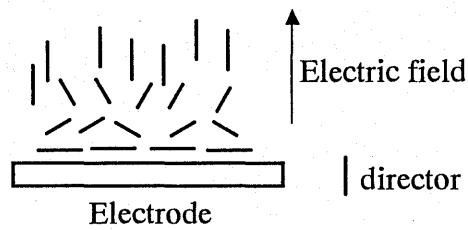


図 5.9 電極界面が配向に与える影響

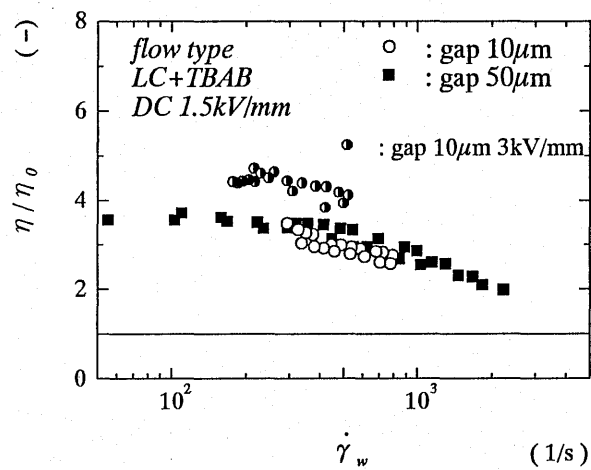


図 5.10 すきまの大きさによる影響 (LC+TBAB, DC)

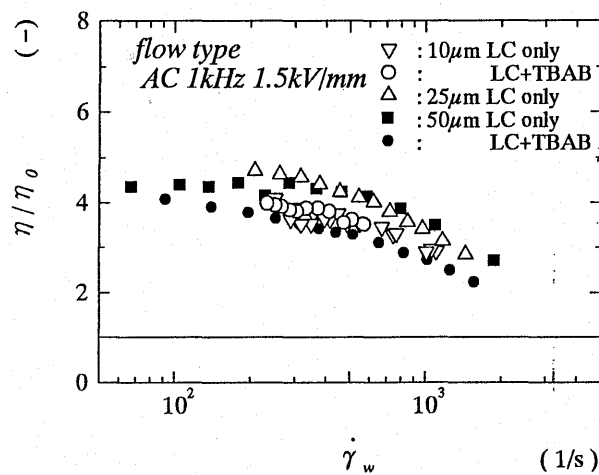


図 5.10 すきまの大きさによる影響 (LC only, LC+TBAB : AC)

## 5.5 流動場の影響

流動場の違いが粘度増加に及ぼす影響を検討するために、図 5.11 に異なる 2 種類の流動場に対する粘度増加の様子を示す。図中の実線、破線は平行円板型回転粘度計の場合の実験結果を、また図中の点は平行平板型 2 次元流路の場合の実験結果である。粘度計の場合のひずみ速度は円板外周部で計算された値であり、粘度はこのひずみ速度と円板外周部でのせん断応力より算出されたものである。LC only の場合では平行平板型 2 次元流路の方が低い粘度増加を示している。

これは、ひとつには電極の材質の影響も考えられる。また 2 次元流路の場合では、すきま方向にひずみ速度の分布が生じており、このような速度分布と液晶の配向状態の関係も原因として考えられるが現時点では詳細は不明である。また 2 次元流路型のように主流がある場合では、主流によって電荷の移動が妨げられ、電極間に流れる電流量が低下することが知られている<sup>(20)</sup>。このため、対流によって粘度が増加する LC+TBAB の場合では、電荷の移動が妨げられることによって、対流によって生ずる流動抵抗自体が小さくなったと考えられる。しかしこの点も更に検討を要する。

なお、図 5.12 に交流電圧印加時の流動場の影響を調べた結果を示す。この場合も LC only、LC+TBAB のどちらの場合も平行 2 平板型流路の方が粘度増加が低いことがわかる。

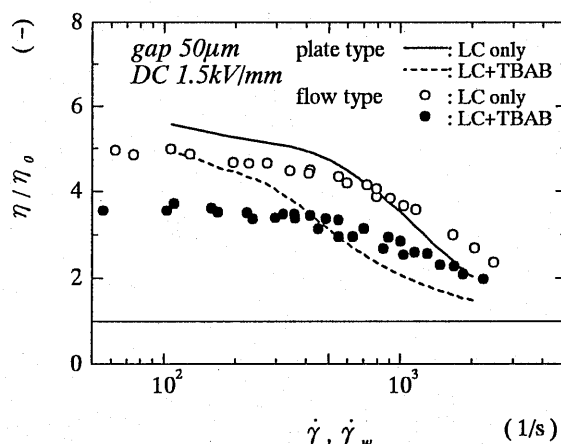


図 5.11 直流電圧印加時の流動場の影響 (LC, LC+TBAB)

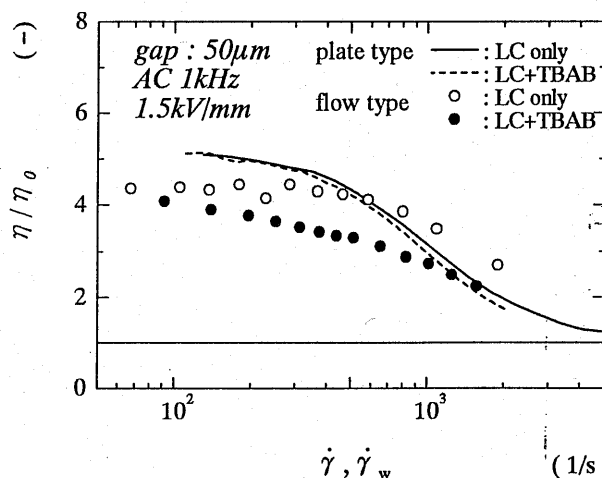


図 5.12 交流電圧印加時の流動場の影響 (LC, LC+TBAB)

## 5.6 応用性について

本研究において液晶の ER 効果はマイクロオーダーの電極間距離においても有効であることが確かめられた。しかし ER 効果の大きさ自体は、従来より用いられている分散系 ER 流体の方が大きいせん断応力が誘起される。分散系 ER 流体は印加する電界強度が 3kV/mm 程度必要とされており、電極間距離を 1mm と仮定すると、必要な電圧は 3kV とかなり高電圧を印加しなければならない。本研究で用いた液晶では粘度増加で 5 倍程度であるが、すきまが 50 $\mu$ m 程度であるため電圧自体は 75V と低電圧で ER 効果が利用できる。

また、粘性抵抗を考慮した運動方程式

$$m \cdot \frac{dv}{dt} + f_v = F$$

において慣性力は代表長さ  $L$  の 4 乗に比例し、粘性力は  $L$  の 2 乗に比例<sup>(22)</sup>する。このため、代表長さ  $L$  が非常に小さいマイクロ構造内では、慣性力は無視できる程度となり分散系 ER 流体ほどの ER 効果がなくとも十分粘性力により運動を支配でき、この程度の ER 効果でも有効性が高いと考えられる。また超小型のポンプが開発されれば、液晶を用いた ER バルブを組み合わせることによってアクチュエーターを構成できるため、マイクロマシン上の動力源として有効な手段となりうる。そういった点で、液晶の ER 効果は超小型の装置の開発においてますます注目を集めると考えられる。

## 第 6 章 結論

狭いすきまにおける液晶の ER 効果の有効性を明らかにするため、平行円板型回転粘度計、及び平行平板型 2 次元流路を用いて電圧を印加した時の見かけの粘度の測定及び偏光顕微鏡による観察を行った。その結果をもとに狭いすきまにおける液晶の ER 効果の有効性を検討し、以下のような結論を得た。

誘電異方性が正の場合

1. 液晶の ER 効果の発生機構には配向によって粘度が増加するものと、対流によって粘度が増加するものの 2 種類ある。
2. 液晶の ER 効果は直流電圧印加時の配向で起こる場合がもっとも大きな粘度増加を示した。しかしこの状態は安定なものではなく条件によっては時間とともに対流状態へ移行した。一方、交流電圧を印加し配向させた場合では、直流電圧印加時の配向状態と同程度の粘度増加を示す
3. 電圧印加時の応答性は直流、交流ともに光学的な応答速度と一致する。
4. 配向状態で粘度が増加する場合、電極間のすきまが 10 $\mu$ m 程度になると電極界面の影響で粘度増加が小さくなる。

誘電異方性が負の場合で、電氣的な対流により生じる ER 効果は、従来の研究結果と比較し透き間の影響がある程度生ずることが明らかになった。しかし ER 効果自体が小さく実用には不向きである。

以上より本研究において、マイクロオーダーの狭い電極間距離であっても、液晶に電圧を印加す

ることによって ER 効果が発生することわかった。そして誘電異方性が正の液晶に対して交流電圧を印加することにより、液晶の純度や劣化などの条件によらず分子配向による安定した ER 効果が期待できることが確認された。この様な特性を利用することにより、2次元流路の結果は直接的にマイクロダンパーへの応用に対応し、また、回転円板型粘度計の結果も含め本研究で得られた結果はマイクロ流体潤滑を考慮する際の貴重なデータとなると考えられる。

## 参考文献

- (1) 知能流体工学に関する調査研究分科会成果報告書、日本機械学会、1995, p2-3
- (2) T. Honda , T. Sasada , Japanese Journal of Applied Physics Vol16, No10 pp.1775-1783
- (3) Winslow, W.M, Induced Fibration of Suspensions, J. Applied Phisics, 20-December (1949),1137
- (4) 小山、ER 流体の開発と応用、シーエムシー、1994
- (5) 永島、浅子 機械学会第 33 期通常総会講演会論文集 (3) p 219, 1996
- (6) 森下、トライボロジー会議予稿集 (東京 1993-5) , p359,1993
- (7) 中野、第 44 回レオロジー討論会、p223,1996
- (8) 浅野、トライボロジスト第 41 巻第 6 号、p 42
- (9) 浅子ほか、トライボロジスト第 41 巻第 6 号 p 48
- (10) T. Sasada, T. Honda 機械の研究 巻 32 第 1 号(1980)より連載、
- (11) 森下、日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集、p41 , 1992
- (12) 福政、日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集(東京 1993-5) , p363 , 1995
- (13) 井上、真庭、佐藤、谷口、第 41 回レオロジー討論会講演要旨集 1993,pp73-76
- (14) 森下、日本機械学会論文集 (C 編) 第 61 巻 581 号、p 43、1995-1)
- (15) 森下、トライボロジー会議予稿集 1993-5、p 373、1996
- (16) 古荘、機械学会第 7 2 期全国大会講演資料集 (VI) p 258-261, 1994
- (17) 松本、角田、液晶の基礎と応用、工業調査会、1991
- (18) チャンドラセカール、液晶の物理学、吉岡書店、1995
- (19) 中田、堀、向尾、液晶入門、幸書房、1992
- (20) 笹田、本多、機械の研究、第 33 巻、第 4 号、(1981)、p533-538
- (21) W.H.de Jeu、石井、小林訳、液晶の物性、共立出版株式会社、1991
- (22) 江刺、藤田、五十嵐、杉山、マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス、培風館、1992

## 第2部 方向性のある流れを生じさせる流動システムの開発に関する基本的検討

(研究経過)

### 1. 緒言

マイクロマシン開発に関わる流体の関連する問題としては、微小流量を制御するマイクロポンプなども開発されているが、それらは従来の機械の延長上にあるものである。マシン全体の微小化を考慮すれば余分な機械的駆動部は少ない方が望ましい。この点から考えれば、流体の動きを機械的な力ではなく電場などの印加によって制御するシステムが理想的と言える。液晶は電場の印加によって分子の配向状態が変化し、粘度が変わることが知られている。またそれだけでなく、液晶ではある種の条件下で自発的な流動が生じる。このような流動を用いれば機械的な駆動部の少ないマイクロ流体システムを構築する事が可能と考えられる。

本研究では液晶を用いて電極間に発生する対流を利用した方向性のある流れを発生させる実験を試みた。この実験に関しては現在も検討を進めており、正式には機会を改めて報告する予定である。ここでは、現在までの経過を簡潔にまとめ、報告とする。

### 2. 実験経過

まず、図1に示すように直径  $100\mu\text{m}$  程度の電極を図のように対抗させて配置し、図の左右方向に電界が発生するように電場を印加した。すなわち、たとえば図の左側2本の電極をプラス、右をマイナスという構成とした。そのときの流体の流動状況を図2に示すような装置を用いて可視化し、観察した。なお、電極の位置関係は図1下部に示すように数通りの場合に関して検討した。実験には誘電異方性が負のネマティック液晶である MBBA を用い、また、可視化のために微小粒子を若干添加した。直流電場を印加した場合の電極間の流れの概略を図3に示す。左右の電極間のギャップ部には激しい対流が生じ、その一部が電極の間を抜ける流れとなる。なお、電極はガラス板で挟まれているが完全に密着していないため電極を跨ぐ流れも存在する。

このようにして観察、さらには流速を測定した結果の1例を図4に示す。上部のグラフの横軸は下部の電極の配置図に対応した流れ方向の座標を示す。横軸の0が電極間のギャップに対応する。縦軸は流体中の微小粒子の動きから算出した流速を表している。ガラスと電極が完全に密着しており、電極を跨ぐ流れがなければこの流速は横軸によらず一定となるはずであるが、電極とガラスのすきまから液晶が流出するため場所によって流速が異なる。しかし、上図から対流の直後には比較的明確な一方向の流れが生じていることがわかる。電極の配置を適宜変化させて実験を行った結果、電極が互い違いの位置にある場合がもっとも流速が高くなることがわかった。

これらの実験を元に、図5に示す微小流路を作成し、実験を開始した。現在、データを取得中であり、正式な結果を今後学会等で発表する予定である。

# 電極形状

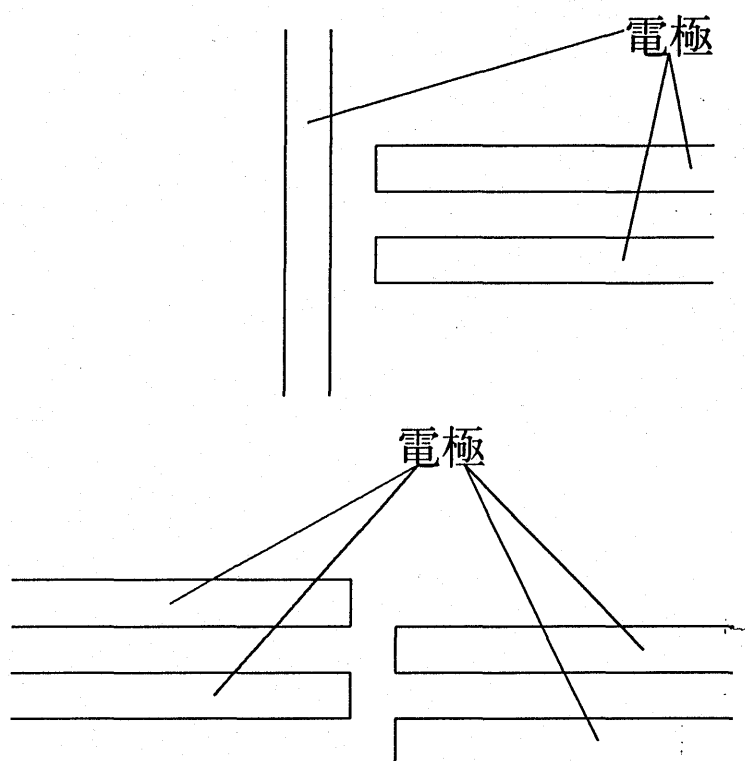
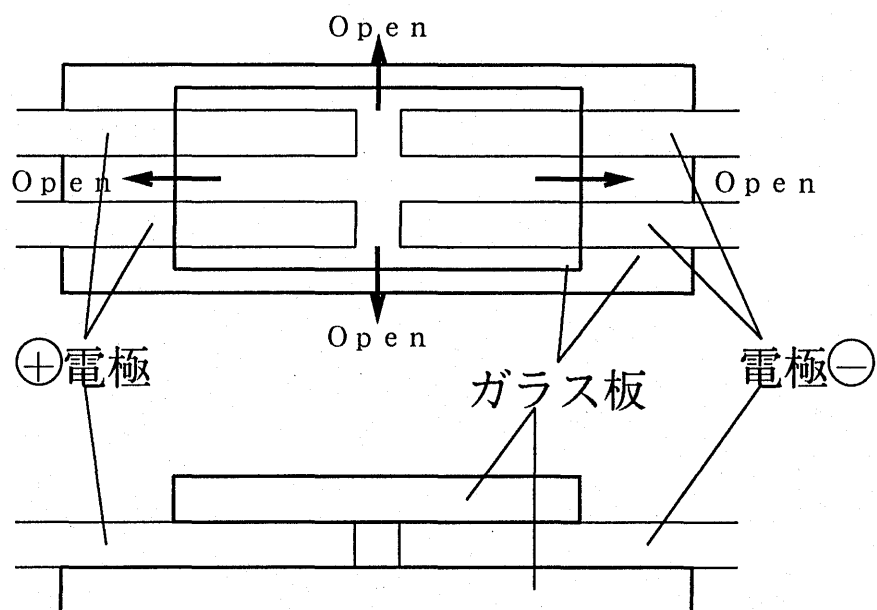
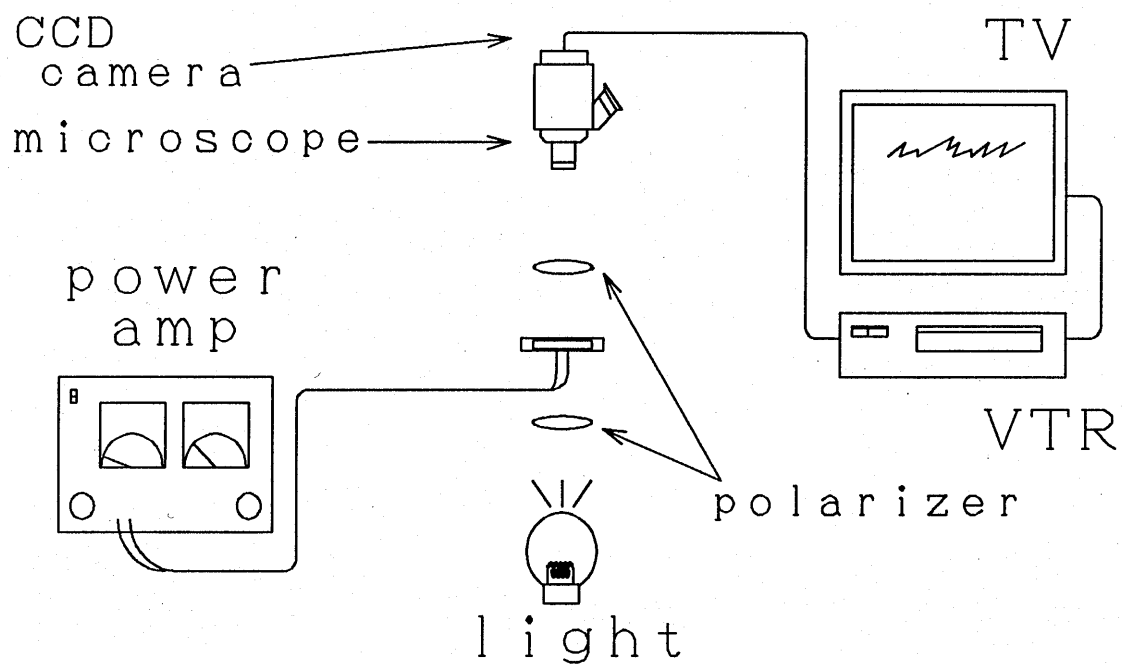


図 1

## 実験装置概略図



## 使用流体

N型ネマティック液晶MBBA

[N-(4-Methoxybenzylidene)-4-butylaniline, 98%(MBBA)]

図 2

# 対流の状態

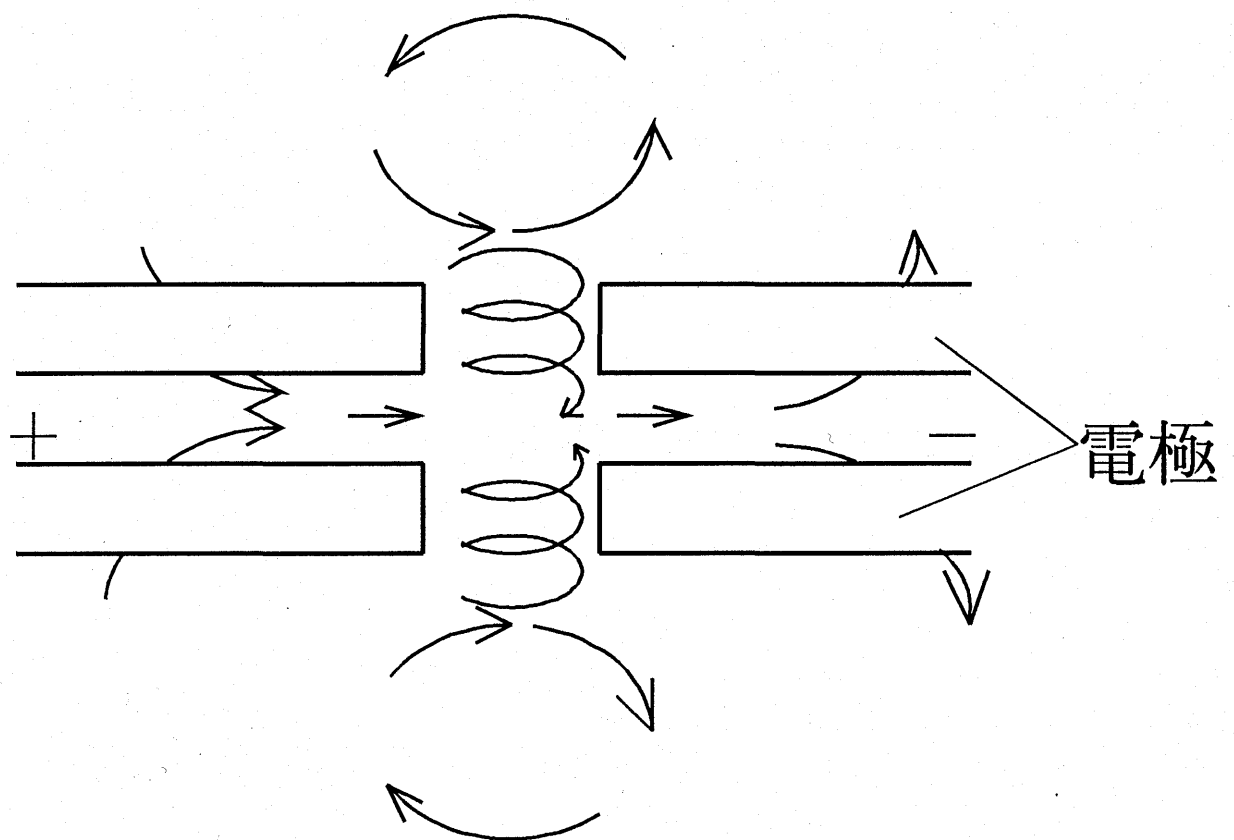


図 3

MBBA  $\phi=0.15\text{mm}$  Gap= $0.15\text{mm}$  Width= $0.075\text{mm}$

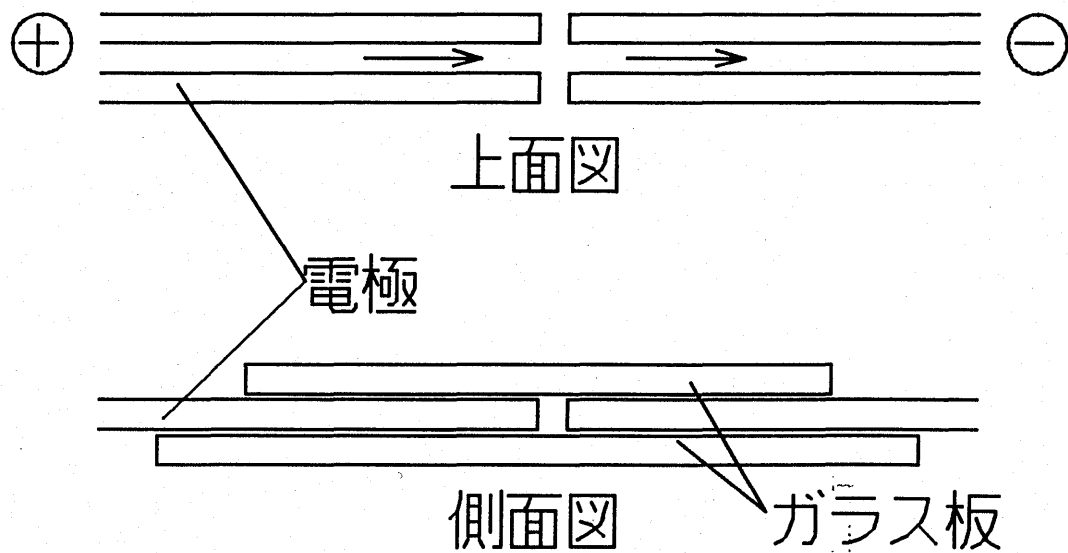
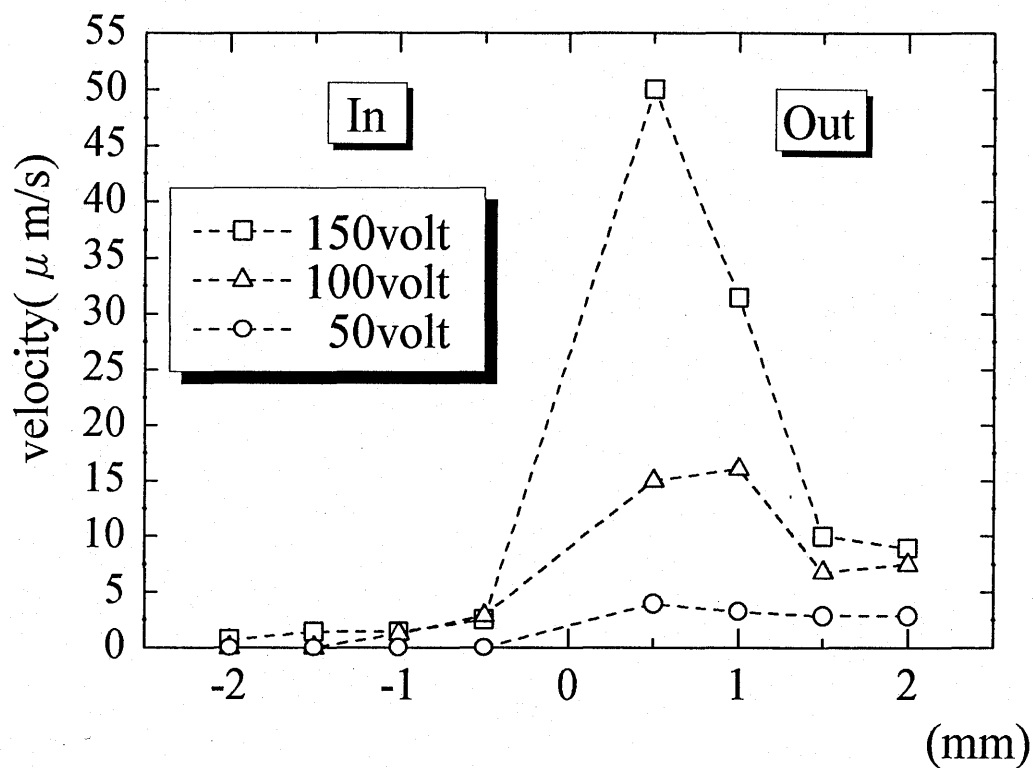


図 4

# Flow Channel

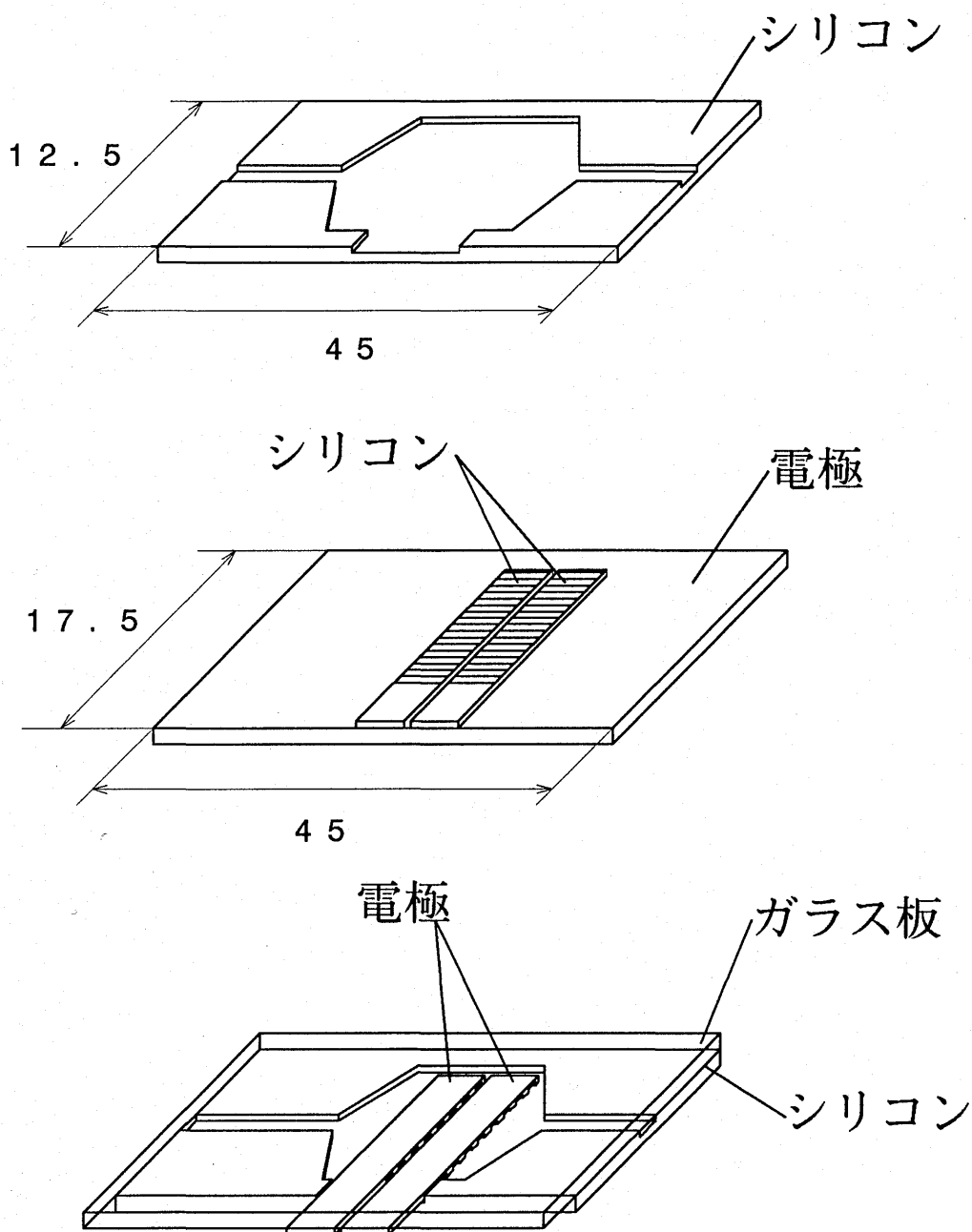


図 5

### 3. 現在までの結論

電場間に発生する対流を利用して方向性のある流れを生じさせる流動システムの開発として、流路の上流と下流で流れ方向に電場をかけ、一方向の流れを発生させる実験を行った。電極間の対流の十分な制御には至らなかったが、櫛歯状の電極を対向させた流路において1方向の流れが発生することが確認された。これは液晶を用いた静電マイクロポンプの作成が可能なことを示しており、液晶の流動を利用したアクチュエータへ発展できると考えられる。

以上

### おわりに

以上のように液晶はマイクロ流体システムへの応用性が高いことが明らかになった。今後さらに静電場での対流を利用した流動システムの開発を継続して行う予定である

終わりに本研究の遂行にあたって有益な助言をいただいた新潟工業短期大学教授 反町和則氏、同大学助手 方 義氏、実験装置作成に協力して下さった、萱場龍一技官、液晶をご提供下さいましたチッソ石油化学工業株式会社、ガラス電極を提供して下さいましたセントラル硝子株式会社、旭硝子株式会社に、心より感謝申し上げます。また、本実験には、新潟大学大学院生の前田浩芳氏、吉澤博之氏の協力を得た。ここに謝意を表す。