

平成 22 年 3 月終了  
博士（工学）学位論文

平行平板間液晶背流の可視化と  
液晶アクチュエータの駆動特性の評価

Visualization of LC Backflow between Parallel Plates  
and  
Evaluation of Driving Performance of LC Actuator

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻(基盤工学コース)

学籍番号 1116013

松見 隆紀

Takanori MATSUMI



# 学位論文要旨

近年、MEMS 技術の発達により、比較的容易に高アスペクト比のマイクロ・ナノサイズの機構部品の作成が可能となった。機構部品のマイクロ化により“センサ・プロセスのように緻密に集積化・積層化が可能”となる他、マイクロサイズの部材で構成されたマイクロマシンは“従来の機械では動作不可能な狭窄部への適用”が可能となる。そのため、マイクロマシン研究の発展に伴い、それを駆動させるマイクロアクチュエータ開発に関する研究が進められている。

現在、開発が進められているマイクロアクチュエータは固体アクチュエータと流体アクチュエータの2種類に大別することができる。固体アクチュエータとして“静電アクチュエータ”、“圧電アクチュエータ”などの開発が、流体アクチュエータとして“ERFアクチュエータ”、“ECFアクチュエータ”などの開発が進められている。固体アクチュエータの駆動原理は電歪効果を用いたものである。数 V 程度で駆動し、機構が単純で小型化が容易であるが、変位量が制限されるという特性を有する。一方、流体アクチュエータは機能性流体の外場に対する物性変化を利用したものである。流体であるため変位量の制限を受けないが、数 kV の駆動電圧を必要とし、原理的に単純であっても実用に際し複雑なシステムを要することから小型化が難しいという特性を有する。このように既存のマイクロアクチュエータはその特性により、適用する用途・場所に応じて一長一短となるものが多い。

一方、蝶野・辻は機能性流体の一つである液晶を利用した液晶駆動型アクチュエータを提案している。この液晶駆動型アクチュエータの駆動原理は数 V 程度の電圧によって液晶分子を回転させ、その際に発生する流動(背流)によるせん断力を利用したものである。このアクチュエータは複雑な機構を必要としないため小型化が容易であり、形状適合性に優れるなど、マイクロアクチュエータとして期待がもたれている。しかしながら、液晶に電場を印加する際の条件により、物体にどのようなせん断力がかかるか、すなわちどのような背流が生じているかについては明確に研究されておらず、アクチュエータ駆動の最適条件を導くための基礎データが得られていないのが現状である。また、背流によって物体を駆動させる場合の詳細な駆動特性は明らかにされていない。そこで、本研究は平行平板間における背流の実測と背流を用いた平板駆動を行う。

本論文は全 4 章で構成され、以下に各章の要旨を示す。

# 第 1 章 序論

本章では、導入として本研究の背景を述べ、液晶に関する知識を与えた後、研究目的について述べている。

## 第 2 章 平行平板間における背流速度分布

本章では平行平板間における背流の速度分布に注目し、その速度分布に与える各種パラメータの影響について実験的に、数値的に検証した。

図 1 に可視化実験で用いる液晶セルを示す。液晶セルは 2 枚の電極膜付きガラスとその間に充填された液晶材料で構成されている。本研究で使用する液晶材料は 4-cyano-4'-pentyl biphenyl(5CB)である。図 2 は液晶セルの座標系であり、実験・数値計算ともに共通の座標系を用いた。液晶分子の配向状態は図のような空間の 1 点におけるディレクタ  $\mathbf{n}$ (液晶分子の平均的配向方向ベクトル)の姿勢を表現する方位角  $\theta(y)$ 、極角(チルト角) $\phi(y)$ を用いて定義する。下部表面と上部表面の  $\phi$  の相対角( $\phi(0) - \phi(H) = \phi_w$ )はツイスト角  $\phi_w$  と定義し、上下表面での  $\theta$  の相対角( $\theta(0) - \theta(H) = \theta_w$ )は相対チルト角  $\theta_w$  と定義する。電場印加によって誘起される液晶流動は配向分布だけでなく、平板間隔、印加電圧の影響を受けることは明らかである。そこで、ツイスト角  $\phi_w$ 、チルト角  $\theta_w$ 、平板間隔  $H$ 、印加電圧  $V$  を背流に影響を与えるパラメータとして導入する。

背流の実測に関しては液晶中に混入した可視化用微粒子をトレースすることで速度分布を測定した。数値計算による予測はネマティック液晶の流れを高い精度で予測する Leslie-Ericksen(L-E)理論を用い、実験と同条件で行った。それぞれの結果を比較検討し、各パラメータが背流の速度分布に与える影響について検証した。図 3 にツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$  における平板間背流の  $x$  方向速度分布を示す。図中のプロットは可視化法を用いた 10 回の実験結果の平均値でありエラーバーとともに表示している。図中の曲線は L-E 理論より得られた数値計算結果である。図より、背流の速度分布は可視化法によって測定され、数値計算結果とも定性的に一致することを示した。他の条件に関しても定性的に一致する結果が得られた。以下はその結果である。

ツイスト角  $\phi_w$  を  $0-180^\circ$  まで  $45^\circ$  刻みで増加させたとき、背流の  $x$  方向速度分布は  $x$ - $y$  面内のみの反対称な S 字分布から、流路上部領域の流動が増加し下部領域が減少する傾向を示し、最終的に一方向流動となった。このとき、 $x$  方向速度  $u_m$  の最大値は  $u_m = 13, 15, 26, 40, 60 \mu\text{m/s}$  とツイスト角の増加に伴い増加する傾向を示した。また  $z$  方向速

度分布に関してはツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$  のとき速度  $w_m = 0 \mu\text{m/s}$  であったがツイスト角の増加とともに速度の発生が見られ, ツイスト角  $\phi_w = 180^\circ$  では反対称な S 字分布となることが確認された. このとき  $z$  方向速度  $w_m$  の最大値は  $w_m = 0, 8, 15, 24, 21 \mu\text{m/s}$  となった. したがって,  $x$ - $z$  面でのツイスト角の増加は発生する背流の速度分布形状を変化させ, 背流の速度を増加させることが得られた.

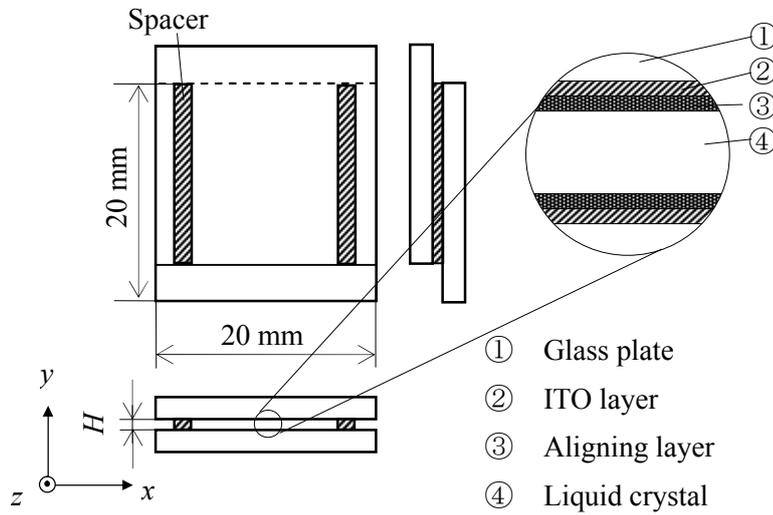


Fig. 1 Experimental setup

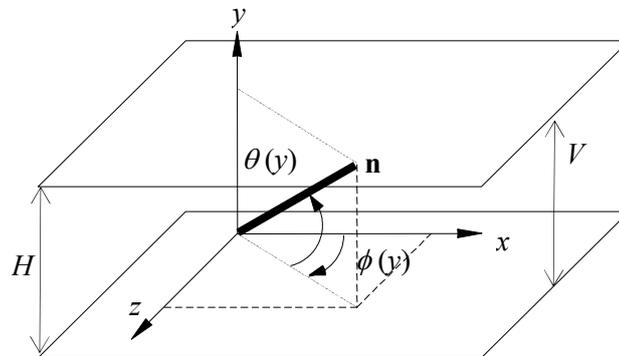


Fig. 2 Coordinate system

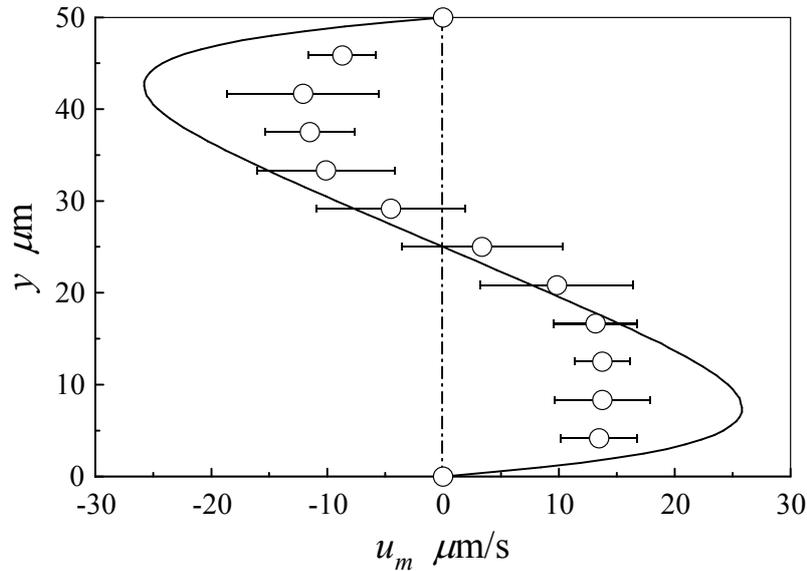


Fig. 3 Velocity profile of the backflow at twist  $0^\circ$

平板間隔  $H$  の減少は相対的に電場強度  $E (= H/V)$  を増加させるが、それによる速度分布の最大値は  $u_m = 21 \mu\text{m/s}$  となり、運動方程式中の  $E^2$  の形で増加せず、他の項の影響を受けることが示された。一方、印加電圧  $V$  の増加に関しても速度分布の最大値は電場強度  $E^2$  の形で増加しなかった。さらに、同電場強度で平板間隔と印加電圧が異なる結果を比較すると、平板間隔が小さい方が速度の絶対値が小さくなる傾向があり、壁面からの液晶分子を束縛する領域の流路を占める割合が背流の大きさに影響を与えることを明らかにした。

配向分布が空間方向に連続的に変化しているハイブリッド配向 ( $\theta_w = 85^\circ$ ) においては、発生した背流の最大速度は  $u_m = 25 \mu\text{m/s}$  とツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$  のときと比べ、増加する傾向を示した。また、背流の最大速度発生時刻がこれまでの  $t = 250 \text{ ms}$  ( $t$  は電圧印加後からの経過時間) と比較して桁違いに速い  $t = 50 \mu\text{s}$  であることが確認された。この場合、トレーサ微粒子の速度変化を正確に取得できないため、微粒子の電場印加後の停止位置で比較検討した。その結果、実験、数値計算結果ともに定性的、定量的に非常によく一致しており、可視化実験による背流の実測と L-E 理論を用いた予測の確かさが示された。また、ハイブリッド配向の応答が非常に速い理由に関して、配向こう配が初期段階から有限の値を持つこと、電場印加による回転トルクが最大となる  $\theta = 45^\circ$  の分子の存在に起因することを示し、配向分布形状が応答速度に影響を与えることを明らかにした。

### 第3章 平板駆動

本章では2章で取り扱った背流を用いて、物体の平板駆動実験を行い、液晶アクチュエータがマイクロアクチュエータとして利用可能であることを検証した。実際の手法としては図4のように液晶セルモデルの上部平板を自由に運動できるようにし、発生した背流のせん断力で上部平板を駆動させるというものである。

電場印加によって上部平板は背流のせん断力によって駆動するが、電場印加による背流の発生は電場入力1回につき1度きりなので、上部平板を連続的に駆動させることはできない。そこで、周波数入力による上部平板の断続駆動を試みる。このとき実験条件として電圧  $V=10\text{ V}$ 、周波数  $f=1\text{-}1000\text{ Hz}$ 、デューティ  $D=5\%$  のパルス波を入力し実験を行った。さらに、液晶アクチュエータの電圧駆動特性を明らかにするため、印加電圧が上部平板移動速度に与える影響を検証した。このとき実験条件として電圧  $V=0\text{-}10\text{ V}$ 、周波数  $f=1, 10, 100\text{ Hz}$ 、デューティ  $D=5\%$  のパルス波で実験を行った。図5は上部平板移動速度に与える周波数の影響を示したものである。図の横軸は印加電圧周波数  $f$  を示し、縦軸は各周波数での上部平板の駆動速度の平均値  $U$  を示す。図のプロットは10セット分の駆動実験の平均値であり、エラーバーとともに表示している。図より、上部平板の移動速度は  $f=175\text{ Hz}$  付近まで、印加電圧周波数の増加とともに増加しピークを迎え、その後周波数の増加とともに減少する傾向を示した。このとき、上部平板の最大速度は  $U=118\text{ }\mu\text{m/s}$  である。周波数によって、上部平板移動速度をコントロールすることが可能であり、周波数の選択と印加時間を制御することで高分解能駆動が実現可能であることを明らかにした。

図6は上部平板移動速度に与える印加電圧の影響を示したものである。図の横軸は印加電圧  $V$  を示し、縦軸は図5と共通である。図より、上部平板移動速度は印加電圧の減少に伴い、各周波数ともに減少していることがわかる。周波数  $f=100\text{ Hz}$  の場合、印加電圧  $V=5\text{ V}$  であっても、 $U=50\text{ }\mu\text{m/s}$  とマイクロサイズの物体を駆動させるに十分な速度を有する。これらのことから液晶アクチュエータはマイクロアクチュエータとして十分に機能できるものと結論でき、今後の実用化に期待が持てる。

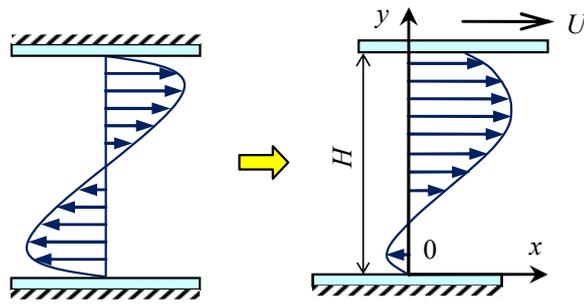


Fig. 4 Schematics of the drive principle

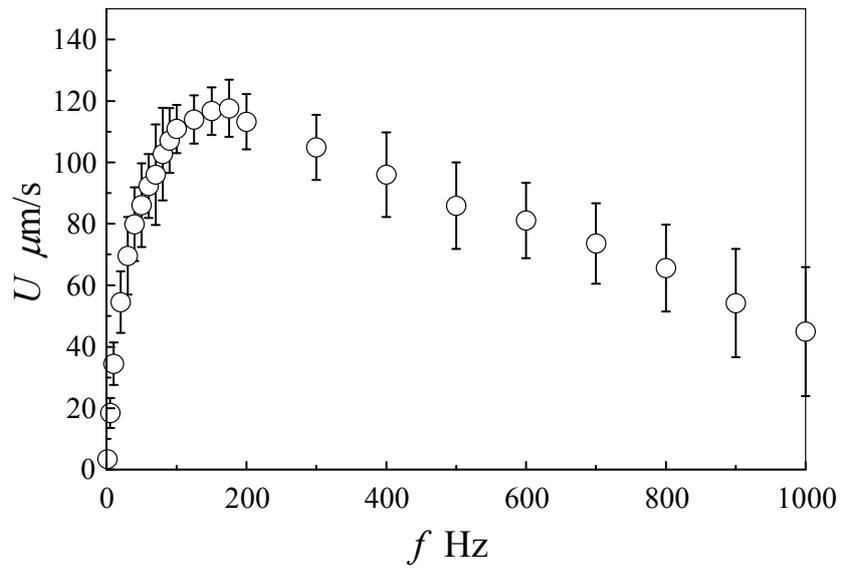


Fig. 5 Effect of the frequency on the moving velocity of the upper plate

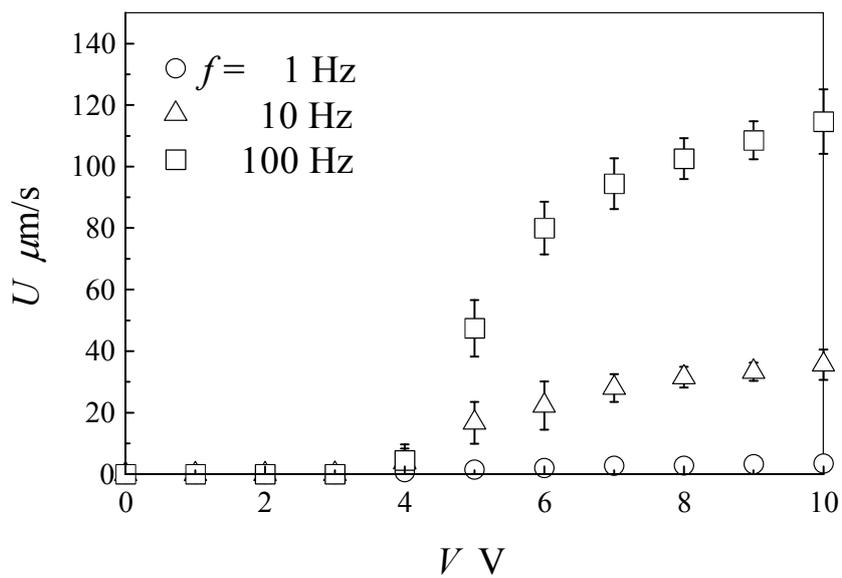


Fig. 6 Effect of the applied voltage on the moving velocity of the upper plate

## 第4章 総括

本章では本研究の総括を行った。

以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) 微粒子を用いた可視化法により，背流の速度分布の測定に成功した。
- (2) ツイスト角の増加は平板間に発生する背流の速度分布形状に大きな影響を与え，その絶対値を増加させる傾向を示す。
- (3) 平板間隔の減少と印加電圧の増加は液晶に直接的に作用する電場強度  $E$  を増加させ，背流の絶対値を増加させる。また，同じ電場強度であっても粘性応力が大きい場合，最大速度が減少する。
- (4) ハイブリッド配向は非常に速い応答速度と比較的大きい速度を示した。配向分布形状により応答速度を制御可能であるといえる。
- (5) Leslie-Ericksen 理論を用いた数値計算による背流の予測は定性的に実験結果と一致したことから，数値計算による背流の予測手法は妥当であるといえる。
- (6) 背流を用いた平板駆動の駆動特性より，印加周波数と印加時間の選択により移動速度と分解能を制御可能である。液晶駆動型アクチュエータはマイクロアクチュエータとして利用可能であることが示された。

# 目次

<b>1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1・1	研究背景	1
1・2	液晶	2
1・2・1	分子式	2
1・2・2	ネマティック液晶	3
1・2・3	誘電率と誘電異方性	5
1・2・4	光学異方性	6
1・2・5	分子場弾性	7
1・2・6	配向束縛(アンカリング)	8
1・2・6・1	流動配向	9
1・2・6・2	ラビング法	10
1・2・6・3	表面張力法	11
1・2・6・4	その他	12
1・2・7	背流効果	12
1・3	研究目的	13
1・4	本論文の構成	13
<b>2章</b>	<b>平行平板間における背流速度分布</b>	<b>14</b>
2・1	緒言	14
2・2	背流の測定手法 (可視化法)	16
2・2・1	実験機器および方法	16
2・2・1・1	実験セルの作成	16
2・2・1・2	実験装置および方法	20
2・2・2	実験精度の検討	21
2・2・2・1	複屈折の考慮	21
2・2・2・2	屈折率の考慮	22
2・2・2・3	空間分解能	23
2・2・2・4	画像解析	23
2・3	背流の予測手法 (数値シミュレーション)	26
2・3・1	支配方程式	26

2・3・2	境界条件および計算方法	27
2・4	結果および考察	31
2・4・1	ツイスト角の影響	31
2・4・2	印加電圧の影響	50
2・4・3	平板間隔の影響	52
2・4・4	ハイブリッド配向の影響	56
2・5	結言	64
<b>3章</b>	<b>背流を用いた平板駆動</b>	<b>66</b>
3・1	緒言	66
3・2	実験装置および方法	69
3・2・1	上部ガラス平板の作成	69
3・2・2	下部ガラス平板の作成	71
3・2・3	実験方法	72
3・2・3・1	スペーサ微粒子入り液晶の作成	72
3・2・3・2	駆動装置の組み立て	72
3・3	実験精度の検証	74
3・3・1	配向状態の確認	74
3・3・2	空間分解能	75
3・3・3	平板間隔の測定	75
3・3・4	画像解析	76
3・4	実験結果および考察	79
3・4・1	印加周波数の影響	81
3・4・2	印加電圧の影響	83
3・4・3	ハイブリッド配向の影響	84
3・5	結言	87
<b>4章</b>	<b>総括</b>	<b>87</b>
	<b>参考文献</b>	<b>90</b>
	<b>本研究に関する論文および発表</b>	<b>93</b>



# 1 章 序論

## 1・1 研究背景

1880 年に液晶は発見された。この液晶は一般の物質と異なり、温度変化による相転移点を固体と液体の間にもう一つ持つ物質の状態名であり、発見当時はその分子構造について詳しく研究されていた。しかし、工学的応用性に欠けるなどの理由で研究活動は下火となっていった。1968 年、RCA 社によって液晶の光学デバイスへの応用が提案され、以降現在に至るまで液晶の光学応用研究は盛んに行われている<sup>(1)</sup>。一方、ディスプレイ用途以外への液晶の研究も行われており、1965 年には Du Pont 社が高分子液晶（ケブラー）を開発し、エンジニアリングプラスチックとして利用されている<sup>(2)</sup>。液晶は固体と流体の中間に位置することから、その両方の性質を兼備するであろうことは理解に難くない。液晶の持つ、固体と流体の特徴を考慮すれば液晶の応用範囲は固体、流体以上に多岐にわたるべきである。しかしながら、上述のように液晶の応用分野は光学系と材料系に偏っている。そのため、液晶の新たな応用例が期待されつつある。

近年、マイクロデバイスに関する研究が盛んに進められている<sup>(3)</sup>。これは、MEMS 技術の発達によるもので、高アスペクト比の部品の作成が比較的容易になったためである。機械要素のマイクロ化は“センサ・プロセッサのように緻密に集積化・積層化が可能”という利点をもたらす。そのため、医療機関、情報産業を含め、これまでにはない多くの機能を有したマイクロデバイスの開発が進められてきている。一部のマイクロデバイスは内部構造に駆動源を持つことが予想される。そのため、マイクロデバイスの開発に付随してマイクロアクチュエータ開発に関する研究が進められている。現在、開発が進められているマイクロアクチュエータは固体アクチュエータと流体アクチュエータの2種類に大別することができる。固体アクチュエータの駆動原理は電歪効果を用いたものである。数 V 程度で駆動し、機構が単純で小型化が容易であるが、変位量が制限されるという欠点を有する。一方、流体アクチュエータは機能性流体の外場変化によって生じる流動を利用したものである。流体であるため変位量の制限を受けないが、数 kV の駆動電圧を必要とし、原理的に単純であっても実用に際し複雑なシステムを要することから小型化が難しいという特性を有する。このように既存のマイクロアクチュエータはその特性により、適用する用途・場所に依じて一長一短となるものが多い。

上述の液晶とマイクロアクチュエータ分野の現状を踏まえて、蝶野・辻は機能性流体の一つである液晶を利用した液晶駆動型アクチュエータを提案している<sup>(4), (5)</sup>。液晶駆動

型アクチュエータは電場によって液晶分子の配向状態を変化させ、その際に発生する流動によるせん断によって物体を動かすという、従来にはないアクチュエータである。このアクチュエータは“構造が単純であり小型が容易”，“形状適合性に優れる”，“低電圧駆動が可能”という利点を有し、マイクロアクチュエータを選定する上で選択肢の一つと成りえる。しかしながら、駆動源である流動が電場印加時の条件に応じてどのような分布形状で生じているかは明らかにされていない。そこで、液晶をアクチュエータの駆動源として利用するために、各種パラメータが液晶流動にどのような影響を与えるか詳細に調査されることが望まれる。

## 1・2 液晶

ここでは本稿で議論していく液晶に関する基礎と知識を記す。

### 1・2・1 分子式

液晶状態を示す物質は図 1-1 に示すように温度変化に対して、固体から液体へと変化する過程で固体と液体の両方の性質を併せ持つ中間状態をとる。このような液晶状態を呈する物質はその分子形状に特徴を有する。一般の分子形状は高分子系を除き図 1-2 に示すようにほぼ球形状となっているものが多い。一方液晶分子は図 1-3 に示すような分子形状を有するものが多い。このため液晶は分子の重心位置のみならず分子の方向によって特性を変化させる特徴を有する。

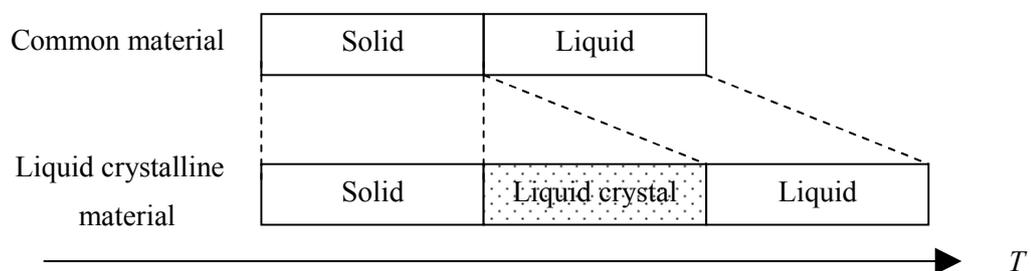


Fig. 1-1 Phase change by the temperature

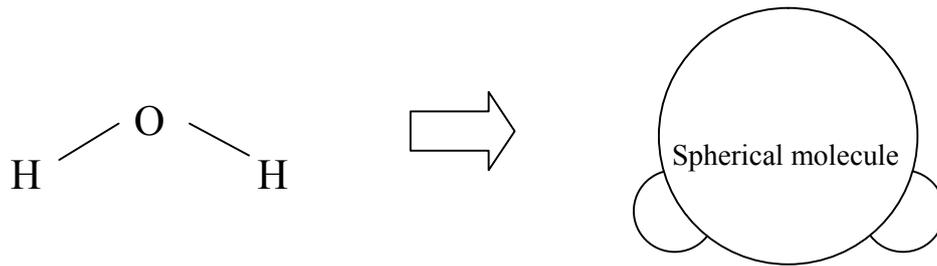


Fig. 1-2 An example of the molecular shape

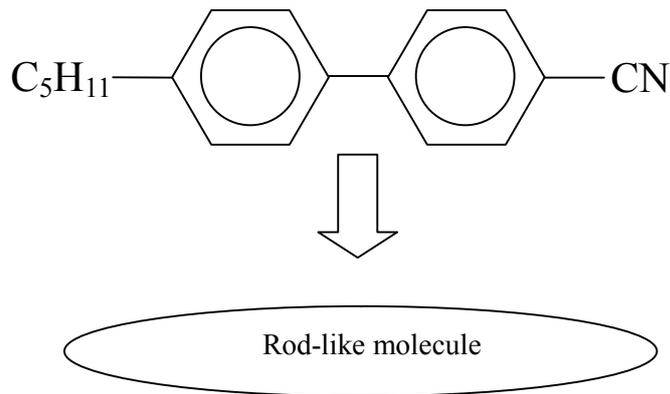
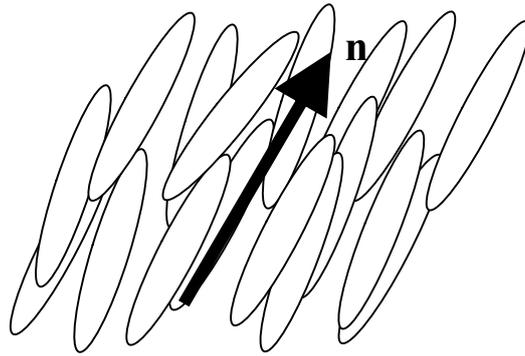


Fig. 1-3 Schematic of the liquid crystalline molecule

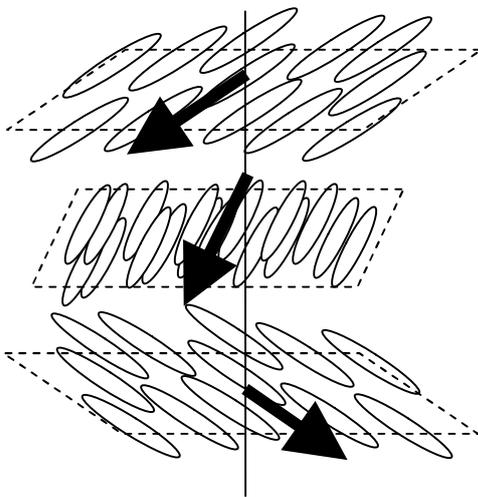
### 1・2・2 ネマティック液晶<sup>(6)</sup>

液晶はその相構造から図 1-4 に示すようないくつかの名称で分類される。

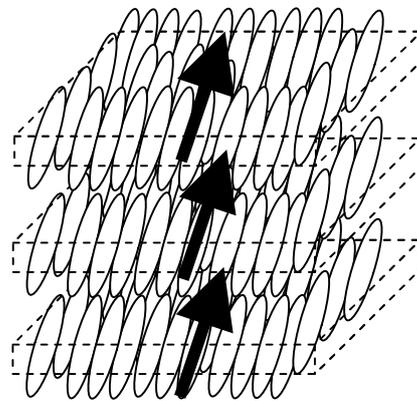
- (1) 配向秩序のみを持ち、重心に関する秩序を持たないネマティック相
  - (2) 配向分布にらせん構造を有するコレステリック相
  - (3) 配向秩序に他、一次元の重心に関する秩序を有するスメクチック相
- などが挙げられる。



Nematic liquid crystal



Cholesteric liquid crystal



Smectic liquid crystal

Fig. 1-4 Examples of the liquid crystalline phase

ネマティック相を有する液晶を通常、ネマティック液晶と呼ぶ。ネマティック液晶は下記に述べる異方性を持ち、重心に関する秩序を持たないことから、液体同様の流動性を示すなどの特徴を有する。このような工業的に重要な特徴を持つことから、ネマティック液晶は液晶ディスプレイに最もよく利用されている液晶である。ネマティック液晶の分子は配向秩序を持つことから図1-4に示すようにある一方向に対してある程度配向する。このときこの平均的な配向方向をディレクタ  $\mathbf{n}$  で定義する。ネマティック液晶の巨視的な電磁気学、光学、流体力学的性質はディレクタ  $\mathbf{n}$  の状態と密接に関わっている。

### 1・2・3 誘電率と誘電異方性<sup>(7), (8)</sup>

液晶は誘電体として知られている。誘電体自身の定義に戻れば、液晶は電荷を通さな  
いはずであるが、実際は不活性イオンなどの分離により僅かながらに電荷の移動が起  
りえる。さて、液晶分子(ここでは一軸性を扱う)はその分子形状から2つの誘電率を有  
する。分子の光学軸に平行な誘電率を $\epsilon_{//}$ 、垂直な誘電率を $\epsilon_{\perp}$ と定義され、これらの値は  
平行平板セルを用いた測定実験で得ることが可能である。このような実験で得られた誘  
電率は液晶分子の電場に対する応答性から様々な工学分野で利用する上で重要なデー  
タとなる。

液晶の誘電率は分子の方向によって異なり、誘電率 $\epsilon$ の物質に電場 $E$ が印加されたた  
きの静電エネルギーは

$$-\frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon E^2 \quad (1.1)$$

で定義され、もし $\epsilon_{//} > \epsilon_{\perp}$ ならば、

$$-\frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon E^2 = -\frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon_{//}E^2 - \left(-\frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon_{\perp}E^2\right) \quad (1.2)$$

だけエネルギー差が生じる。このため、液晶分子の光軸は電場に対して平行に配向して  
いる方がエネルギー的に安定する。すなわち、図 1-5 のように任意の方向にある液晶分  
子に電場を印加すると、液晶分子は光軸を電場に対して平行になるように回転する。電  
場と分子配向方向の安定する方向は誘電異方性 $\Delta\epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$ の正負によって決定される。  
したがって、誘電異方性 $\Delta\epsilon$ が負の場合、図 1-5 の液晶分子は電場に対して垂直に配向  
する。また、誘電異方性の絶対値 $|\Delta\epsilon| = |\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}|$ が大きければ、液晶は電場に対し顕著な  
反応を示し、液晶をデバイスなどに応用する場合、性能の向上が期待できる。また、磁  
場下においても透磁率異方性によって同様の傾向を示し、これらの傾向は電場と磁場下  
で相似の関係を示す。

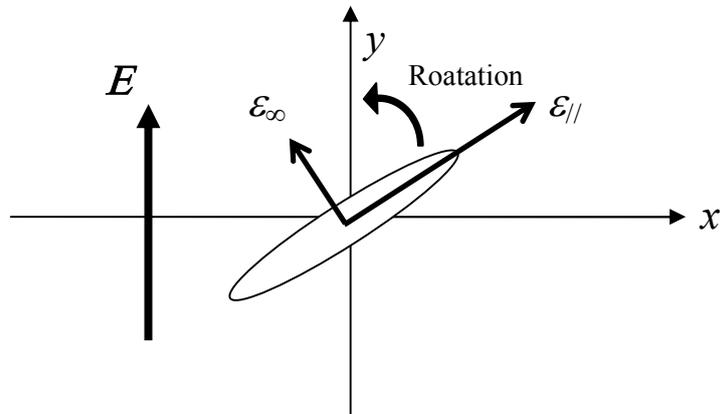


Fig. 1-5 Rotation of the liquid crystalline molecule on the electric fields

### 1・2・4 光学異方性<sup>(7), (8)</sup>

光は電場の一種として捉えることができるので、電場に対して誘電異方性を持つ液晶は光に関しても異方性を有することは容易に想像できる。液晶分子の屈折率を取り扱う場合、分子の長軸方向に垂直な屈折率を  $n_o$  といい、分子の長軸方向に平行な屈折率を  $n_e$  と定義する。この  $n_o$  と  $n_e$  の差を複屈折性と呼び

$$\Delta n = n_e - n_o \quad (1.3)$$

で定義される。 $\Delta n$  の大きさは分子形状に起因し、特にベンゼン環やシアノ基は  $\Delta n$  を大きくする傾向がある。この複屈折性は特に偏光に対して大きな影響を与え、 $n_e$  と偏光の方向によっては無視できない光路差を生み出す。図 1-6 は 2 つの振動方向を持った光が一軸性の媒質に入射し、媒質の屈折率により光路が変化する様子を示す。 $n_e$  によって光路を変化させられた光を異常光(extraordinary light)と呼び、光路が変化しない光を常光(ordinary light)と呼ぶ。異常光と常光の光路差は媒質の屈折率と媒質の厚みに影響を受ける。

屈折率の測定方法はいくつかあり、例えばくさびセルを用いた測定方法などが挙げられる。また、これらの測定は温度依存についての研究も行われ、液晶相から等方相に遷移すると屈折率異方性は失われ、 $n_o$  よりも僅かに大きなただ一つの屈折率を持つことが確認されている。

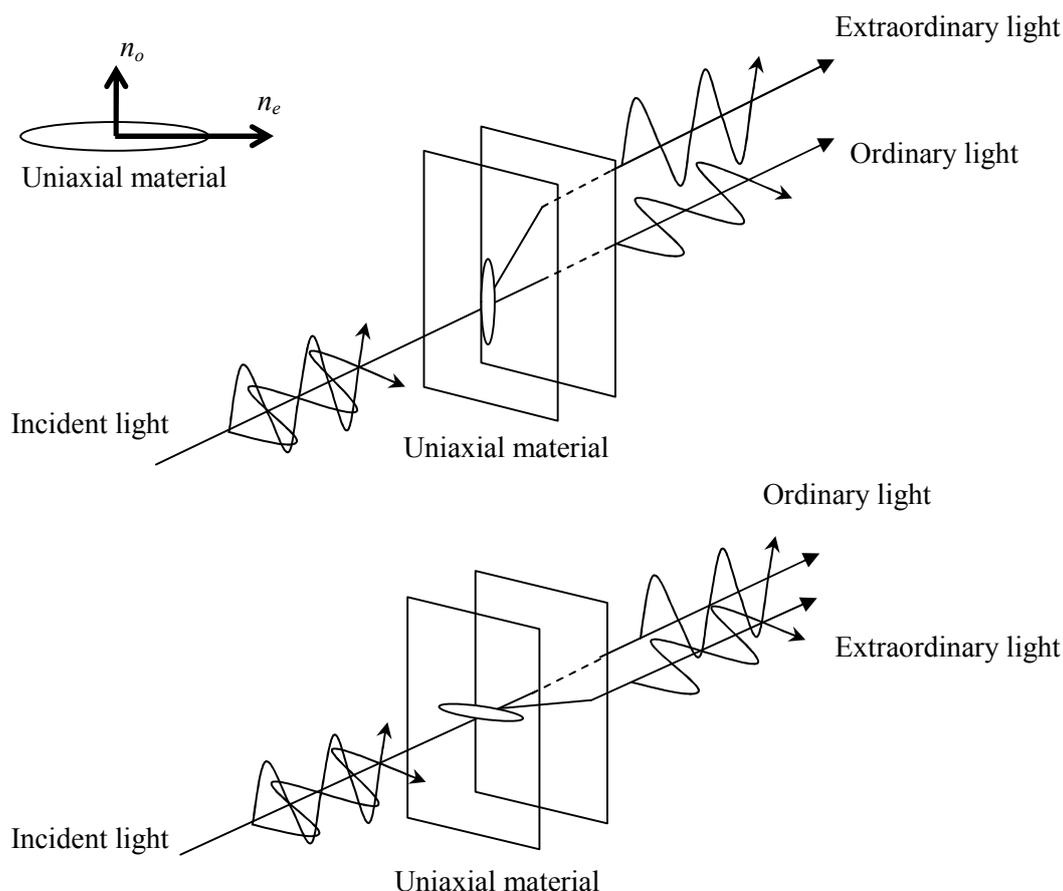


Fig. 1-6 Birefringence of the liquid crystal

### 1・2・5 分子場弾性<sup>(9), (10), (11)</sup>

弾性体に外力を加え、歪みを与えた場合、物質中の分子間距離に変化が生じ、その変化を戻そうとする復元力が発生する。しかし、粘性体の場合、復元力は発生しない。一方で、液晶の場合は分子の向きに関してはある程度の秩序を有している。

一般に液晶の変形を考える場合、以下の3つの状態が考えられる。図 1-7(a)のように分子の短軸方向に歪みが生じていく場合を、**Splay** 配向と呼ぶ。図 1-7(b)のように分子の短軸方向にツイスト構造を持つ場合を、**Twist** 配向と呼ぶ。図 1-7(c)のように分子の長軸方向に歪みが生じる場合を **Bend** 配向と呼ぶ。液晶の変形は基本的にこれらの組み合わせで表現でき、それぞれに弾性定数が定められている。弾性定数  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$  でそれぞれ広がり、ねじれ、曲がりに対応する。また、F.C.Frank はネマティック液晶に関してフランクの自由エネルギー式、

$$F = \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} \{ \mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n}) \}^2 + \frac{1}{2} K_{33} \{ \mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n}) \}^2 \quad (1.4)$$

を導いている。液晶分子の配向状態はこのエネルギーが最小になるように配向する。一般的に、 $K_{22}$  が一番小さく、 $K_{33} > K_{11}$  となるのが普通である。

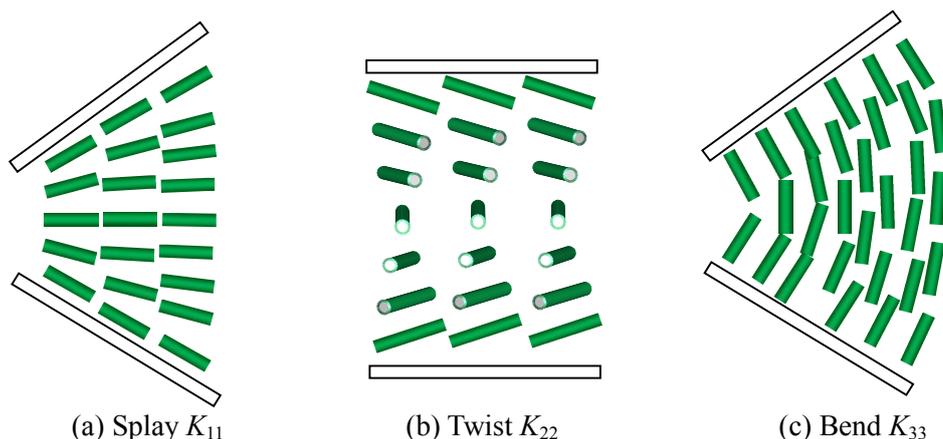


Fig. 1-7 Elastic constants of various alignment modes

### 1・2・6 配向束縛(アンカリング)効果<sup>(11)</sup>

ネマティック液晶は外壁などからの相互作用がない場合、ある程度の長距離秩序で配向したマイクロな領域(ドメイン)が存在する。各ドメイン間には転傾と呼ばれる欠陥構造が生じ、マクロな視点では均一に配向しない。液晶ディスプレイに代表されるような液晶デバイスではアンカリング効果を用いて液晶分子を均一に配向させることで良好な性能を得ている。

液晶分子の配向方向が隣接する固体壁面上で固定されることをアンカリングといい、その強さをアンカリング強度と呼ぶ。アンカリング強度には図 1-8 に示すように $\theta$ 方向の極角アンカリング強度と $\phi$ 方向の方位角アンカリング強度があり、前者は広がりや曲がり配向に影響し、後者はねじり配向に影響する強度である。

以下は液晶分子を均一に配向させるため考案された配向技術である。

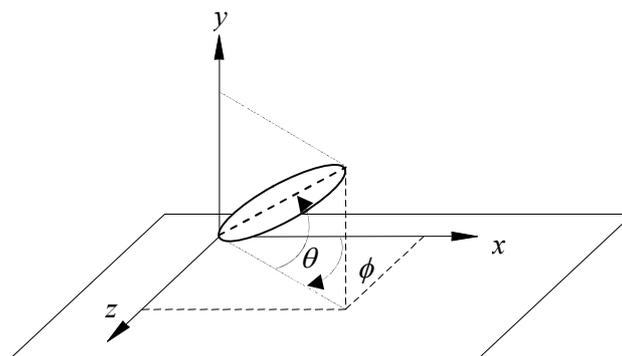


Fig. 1-8 Polar and azimuth anchoring strength

### 1・2・6・1 流動配向<sup>(12)</sup>

洗浄したスライドガラスに液晶を滴下し、カバーガラスを重ね、そのガラスを動かすことで液晶にせん断方向の力を加えると、液晶はせん断流れによって流動方向に配向することが知られている。また、2枚のスライドガラスの間にスペーサ(厚み 10-100  $\mu\text{m}$  程度)を挟み、できた空間に液晶を液晶相状態で流し込むと偏光観察で容易に流動配向が確認できる。このメカニズムはいまだに明らかにされていないが、図 1-9 に示すように平板間に生じたせん断流れによって液晶分子が整列させられことで生じていると考えられている。

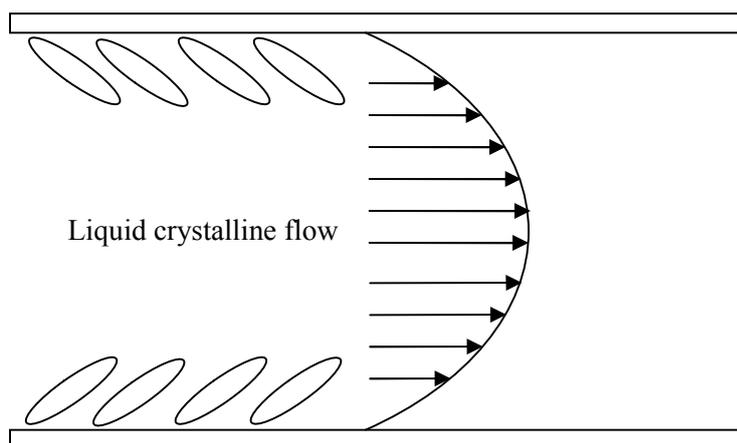


Fig. 1-9 Schematic of the flow alignment

## 1・2・6・2 ラビング法<sup>(11), (13)</sup>

ガラス基板またはガラス基板上に成膜した高分子膜を布で一定方向に擦ることでアンカリング方向を均一にする方法をラビング法と呼ぶ。ラビング法による配向原理はいくつかの仮説があるが、定説的なものはない。ラビングによってガラス表面上の酸化膜または高分子膜が一定方向に延伸させられることで、高分子に沿うように液晶分子が配向するという説、ラビングによって基板表面に生じる傷や凹凸に液晶分子の弾性歪み効果によって傷方向に長軸が沿うように配向する説、などが挙げられる。また、ラビング処理によってチルト角 $\theta$ という液晶分子が基板表面から立ち上がる角度(極角)が生じる(図 1-10)。このチルト角は TN 型液晶ディスプレイを製作する上で考慮されるべきパラメータである。仮にチルト角がない状態でツイスト配向状態を作った場合、ねじれ方向はどちらの回転方向も許容できる。これをリバースチルトといい、ドメインごとに発生した場合、液晶欠陥の原因となる。チルト角の大きさは基板表面上に成膜された高分子膜材料、使用する液晶材料、ラビング条件によって異なるが、大まかな配向角を決定するのが前者の 2 つであり、その角度からの微小角を決定するのがラビング条件であるとされている。

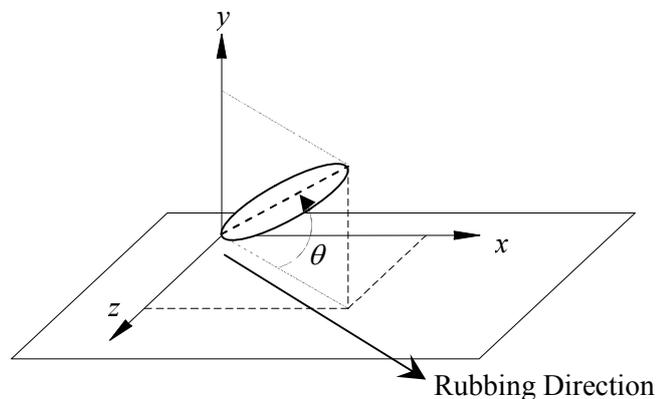


Fig. 1-10 Tilt angle and rubbing direction

一般的なラビングは布を巻いたローラーを高速回転させ、基板を載せたステージを移動させることで、ガラス基板を擦る(図 1-11)。このときラビング条件として、ロール周速度、ステージ移動速度、ラビング回数、ロール接触長(またはステージ押し込み量)がある。ディスプレイメーカーなどはこれらのパラメータを任意に変更して希望のチルト角を得るが、定量的な指標としてラビング長あるいはラビング密度が提案されている。ラビング長は、

$$L = \frac{Nl}{1000} \left(1 + \frac{U}{v}\right) \quad (1.5)$$

で定義され,  $N$ がラビング回数,  $l$ が接触長,  $U$ が周速度,  $v$ がステージ移動速度である. このラビング長が長い場合, チルト角は小さくなり, 短い場合, チルト角は大きくなる. ことが明らかにされている.

Number of rubbing  $N$

Revolution  $n$  rpm

Circumferential velocity  $U = \frac{d\pi n}{60000}$

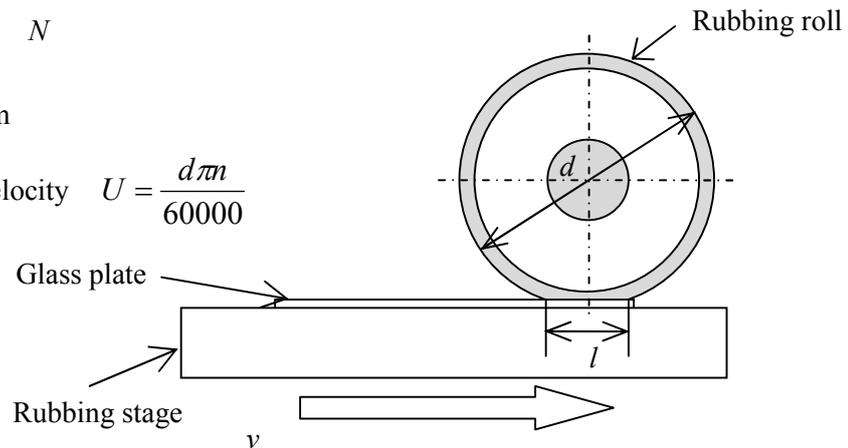


Fig. 1-11 Rubbing system

### 1・2・6・3 表面張力法<sup>(11)</sup>

高分子材料を成膜した基板表面の臨界表面張力と液晶材料の表面張力によって配向時の大まかなチルト角が決定される. 図 1-12 は基板表面上に液晶が滴下されたときの表面張力つり合いモデルである. 一般的に基板表面の臨界表面張力は,

$$\gamma_c = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad (1.6)$$

で表され, この大きさは配向材料によって決まる.

$\gamma_{lv}$ すなわち液晶材料の表面張力と $\gamma_c$ の大小関係が,  $\gamma_{lv} > \gamma_c$ の場合に垂直配向となり,  $\gamma_{lv} < \gamma_c$ の場合に水平配向となる. 垂直配向は基板に対して垂直に配向するため, 方位角に関する均一性は無視できる. 一方水平配向の場合は上述のラビング処理による方位角の均一化およびチルト角の微調整が必要となる.

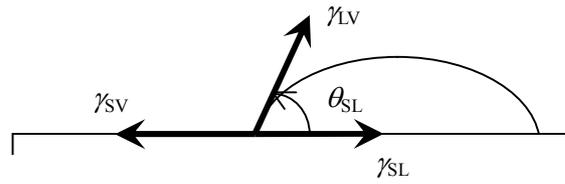


Fig. 1-12 Schematic of the surface tension

## 1・2・6・4 その他

上記の配向処理手法の他に、Langmuire-Blodgett 膜(LB 膜)累積法<sup>(14)</sup>、斜方蒸着法<sup>(15)</sup>、光配向手法<sup>(16)</sup>などが挙げられる。ディスプレイに関して言えば、後者の光配向手法でシャープ株式会社が量産化技術に成功している<sup>(17)</sup>。

## 1・2・7 背流効果<sup>(18), (19), (20)</sup>

誘電異方性が正である液晶を、図 1-13 のように配向処理を施した 2 枚の平行なガラス基盤の間に封入したセルモデルを考える。液晶は基盤処理面の配向束縛によりガラスに対してある程度のチルト角を持って配向する。このセルに電場を印加すると液晶分子の長軸は誘電異方性により電場方向に平行になるように再配向する。このときディレクタの回転に伴い、2 平板間中に流動が発生していることが知られている。このディレクタの回転に伴う流動を背流(back-flow)と言う。

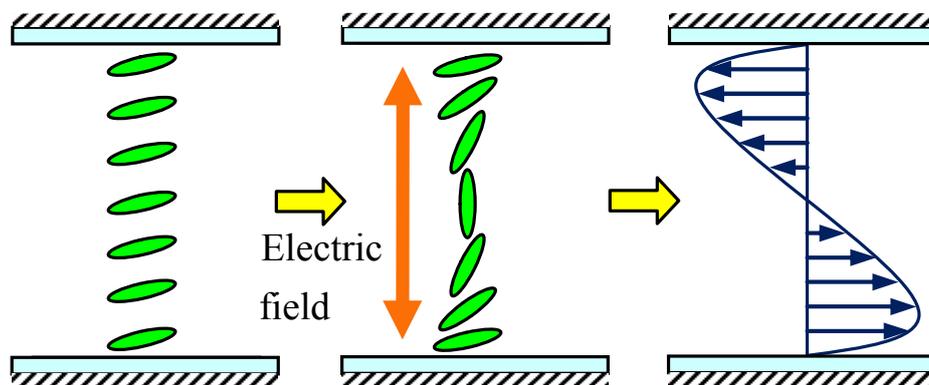


Fig. 1-13 Schematics of the back-flow effect

### 1・3 研究目的

前節では電場印加時に生じる背流について述べた。本研究の目標である液晶駆動型アクチュエータはこの背流を駆動源とするものである。背流の存在は液晶ディスプレイ開発当初から予見されていたものだが、実際にどのような背流がどのような条件で発生しているかは明らかにされていなかった。背流を液晶の駆動源として利用する場合、アクチュエータ駆動に最適な背流を発生させることが望まれる。したがって、平板間内部での背流の速度分布と各種パラメータの相関を明らかにする必要がある。本研究は電場印加時のディレクタの分布および電場印加条件が背流の速度分布に与える影響を明らかにする。また、実際に背流を用いて物体を駆動させ、電場印加条件および入力条件による液晶駆動型アクチュエータの駆動特性を明らかにすることを目的とする。

### 1・4 本論文の構成

本論文は本章を含め全4章で構成される。第1章では序論として、研究背景、液晶に関する知識を紹介した。第2章では液晶流動(背流)の速度分布測定を目的とした可視化実験および、数値シミュレーションによる予測に関する諸説明を行い、実測結果との比較検討・考察を行う。第3章では2章で得られた知見をもとに液晶流動を用いた物体移動実験を行う。さらに、電圧入力パラメータが物体移動速度に与える影響を調べた。第4章で本研究の総括を行う。

## 2 章 平行平板間における背流速度分布

### 2・1 緒言

本章では電場印加時に生じる背流について、可視化法を用いて背流を実測し、その後数値シミュレーションによる背流の予測を行う。

図 2-1 に本研究で用いる液晶セルの一例を示す。液晶セルは 2 枚の導電板とその間に充填された液晶材料で構成されている。本研究で使用する液晶材料は 4-cyano-4'-pentyl biphenyl(5CB)である。分子量が 250 である 5CB は 23~35°C でネマティック相(液晶相)を発現する。表 2-1 は室温 25°C における 5CB のレズリー粘性係数  $a_1$ - $a_6$ 、分子場弾性定数  $K_1$ - $K_3$ 、誘電率  $\epsilon_{\perp}$  および  $\epsilon_{\parallel}$  を示している。なお、密度は  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  である。図 2-1 のような配向分布(ディレクタ分布)は上下平板表面での液晶分子の姿勢(配向)によって定義される。

配向分布を定義するため、図 2-2 に示すような空間の 1 点におけるディレクタの姿勢を表現する方位角  $\phi(y)$ 、極角(チルト角) $\theta(y)$ を導入する。下部表面と上部表面の  $\phi$  の相対角( $\phi(0) - \phi(H) = \phi_w$ )はツイスト角  $\phi_w$  と定義し、上下表面での  $\theta$  の相対角( $\theta(0) - \theta(H) = \theta_w$ )は相対チルト角  $\theta_w$  と定義する。

電場印加によって誘起される背流は配向分布だけでなく、平板間隔、印加電圧の影響を受けることは明らかである。そこで、ツイスト角  $\phi_w$ 、チルト角  $\theta_w$ 、平板間隔  $H$ 、印加電圧  $V$  を背流に影響を与えるパラメータとして導入する。本章ではこれらパラメータが背流に与える影響について明らかにすることを目的とする。

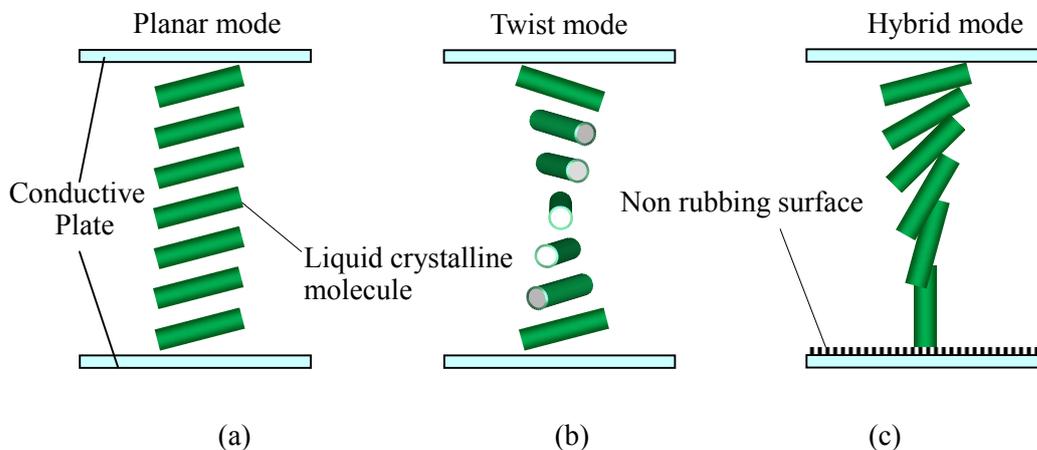


Fig. 2-1 Planar, twist and hybrid modes for molecular configuration

Table 2-1 Materials constants of 5CB

						Pa·s	N			F/m	
$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$		$K_1$	$K_2$	$K_3$	$\epsilon_{//}$	$\epsilon_{\perp}$
						$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-12}$			$\times 10^{-11}$	
0	-8.6	-0.4	8.9	5.9	-3.1	6.37	3.81	8.60	15.7	5.7	

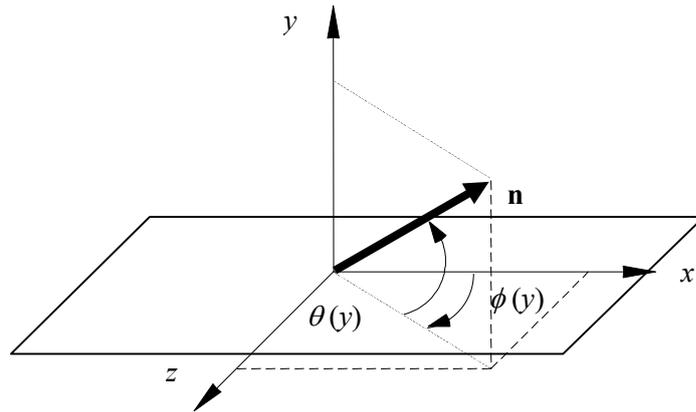


Fig.2-2 Coordinate of the director

## 2・2 背流の測定手法(可視化法)

背流の実測を行うため、可視化法を用いる。本節では液晶セルの作成および測定方法、測定精度について述べる。実験結果は2・4節で数値シミュレーション結果とともに議論される。

### 2・2・1 実験機器および方法

#### 2・2・1・1 実験セルの作成

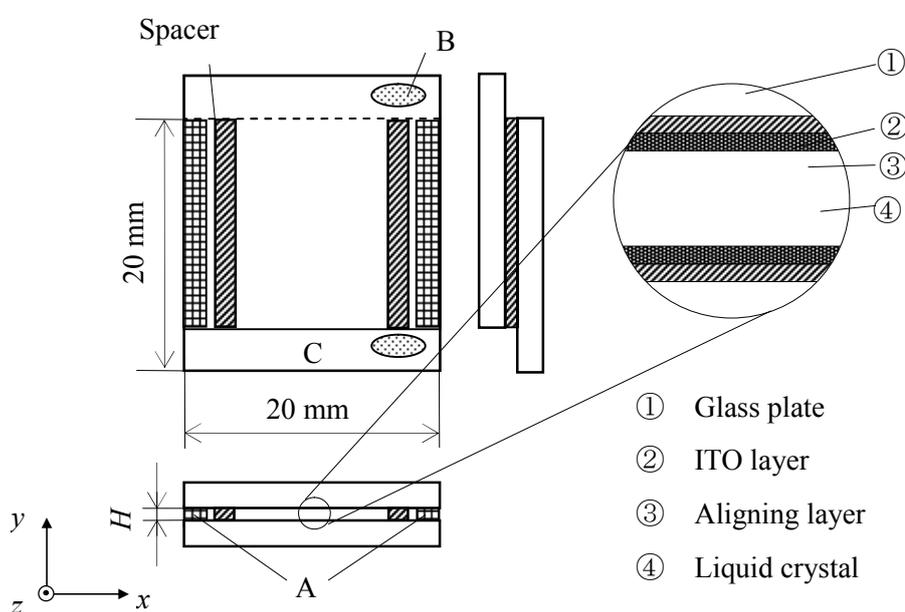


Fig. 2-3 Experimental cell

図 2-3 に可視化実験のために自作した実験セルを示す。背流の観察を容易にするため透明電極膜(ITO 膜)が蒸着された、大きさ 20×20 mm のガラス平板(株EHC)を導電板として用いる。表 2-2 に EHC 社製ガラス板のスペックシートを示す。図 2-1 に示すような配向分布を得るため、すなわちガラス平板表面での液晶分子の姿勢を決定するため、ガラス平板表面上に配向材料を成膜する必要がある。本実験では水平配向材料(オプトマーAL3046:JSR(株))と垂直配向材料(JALS-2021-R25:JSR(株))の 2 種類の配向材料を使用する。各配向材料を以下のように成膜処理する。各配向剤は表 2-3 に示すスピンコート条件で処理される。スピンコート後、ガラス平板は 180℃で水平配向材料では 10 分間、

垂直配向材料では 20 分間焼成する。焼成処理の後、水平配向材料を成膜したガラス平板のみを表 2-4 に示す条件でラビング処理を施し、垂直配向膜が成膜されたガラス平板はラビング処理を施さない。このように処理された配向材料は配向膜として機能する。水平配向膜は隣接する液晶分子を配向膜面から若干の傾斜角(プレチルト角)で配向させる機能を有する。一方、垂直配向膜は液晶分子を配向膜面に対して垂直に配向させる機能を有する。2 枚のガラス平板を図 2-3 のようにフィルム状スペーサ(テイジンテトロフィルム:帝人デュポンフィルム(株))を間に挟みながら固定する。その際、図 2-3 に示す A の箇所(反対側も同様)にエポキシ樹脂(アラルダイト:ハンツマン・アドバンスト・

Table 2-2 Spec sheet of the ITO glass plate

ガラス	材質	ソーダ石灰ガラス
	屈折率	1.510±0.015 1.53(膜面側)
	板厚	0.7 mm
	研磨	研磨無し
	サイズ	20×20 mm
ITO 膜	膜の種類	酸化インジウム
	膜の製法	スパッタリング(金属膜酸化)
	膜厚	200-300 Å
	膜の抵抗率	100-200 Ω/□
	屈折率	1.95
	サイズ	20×20 mm



Fig. 2-4 Spin-coating machine

Table 2-3 Condition of the Spin-coating method

使用装置	1H-DX2(ミカサ(株))	
成膜条件	滴下量	360 $\mu$ l
	回転数	4500 rpm
	立ち上がり	10 sec
	定常回転	20 sec
	立下り	5 sec



Fig. 2-5 Rubbing machine

Table 2-4 Condition of the rubbing process

使用装置	RM-50(株EHC)	
ラビング条件	押し込み量	300 $\mu$ m
	回転数	400 rpm
	ステージ速度	200 mm/min
	ラビング回数	2

マテリアルズ(株)を充填し、その後 100°Cで 10 分間熱処理し、硬化させる。実験条件に応じて厚み  $H=25, 50 \mu\text{m}$  の 2 種類のフィルムスペーサを用意した。

2 種類の配向膜の組み合わせによって、水平配向膜のラビング方向が上下で対向した水平配向(図 2-1(a))、水平配向膜と垂直配向膜とのハイブリッド配向(図 2-1(c))が得られる。さらに、水平配向膜のラビング方向の選択とカイラル剤(CM-33:チッソ石油化学工業(株)の 5CB への添加によって、ツイスト配向(図 2-1(b))が得られる。カイラル剤はツイ

スト配向を誘発させる材料であり、5CB に質量分率 0.1% で添加した。このとき、液晶の螺旋ピッチ長は  $87.1 \mu\text{m}$  である。

実験セルと電源との接続を容易にするため、図 2-3 の B の位置に導線をはんだ付け処理する。ガラス基板表面に塗布された配向膜は電荷を保持する二次効果から抵抗値が高い。そのため、実験セルに電場を印加し易くするため B の位置の配向膜を、溶解剤( $\gamma$ -ブチロラクトン: JSR(株))を用いて溶解させ除去する。ガラスへのはんだ処理は超音波はんだごて(サンボンダー-USM-III: 黒田テクノ(株))とはんだ(セラソルザ: 黒田テクノ(株))を用いた。

背流を可視化するため、平板間隔  $50 \mu\text{m}$  の場合、直径  $2.5 \mu\text{m}$  のシリカ微粒子(マイクロパール: 積水化学工業(株))を液晶に適量分散させた。体積分率は予備実験より 0.01% 程度である。平板間隔  $25 \mu\text{m}$  の場合には直径  $1 \mu\text{m}$  のシリカ微粒子を使用した。

実験セルの液晶への注入は以下のように行った。流動配向の影響を除去するため、微粒子入り液晶および実験セルを、ホットプレートを用いて等方相温度まで加熱し、マイクロピペットを用いて液晶を実験セルの C の箇所(図 2-3)に滴下した。液晶は毛細管現象にて実験セルに自動的に侵入していき充填される。その後、実験セルを室温まで自然冷却する。図 2-6 に完成した実験セルの一例を示す。なお、図中のインクで記された矢印はガラスの裏表およびラビング方向を認識するための印である。

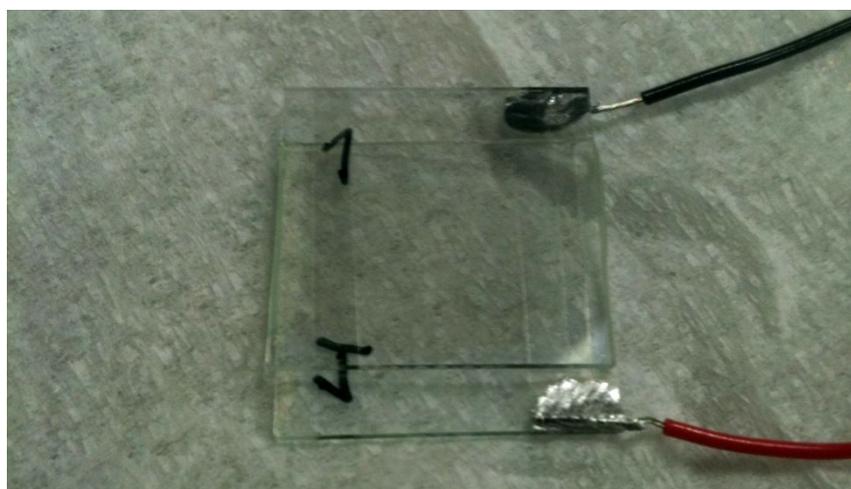


Fig. 2-6 Experimental cell

## 2・2・1・2 実験装置および方法

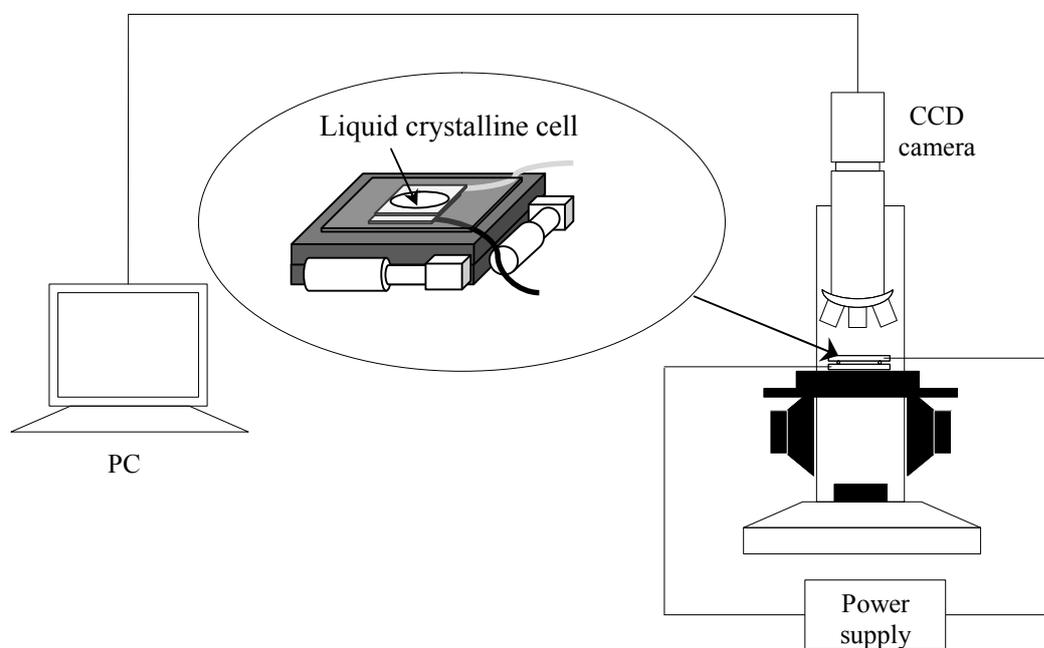


Fig. 2-7 Schematic of the experimental setup

図 2-7 のように作成した実験セルを 2 次元トラバース装置に固定し、さらにそれを偏光顕微鏡(OPTIPHOT2-POL: 株式会社ニコン)に設置した。偏光顕微鏡の偏光子および検光子は平行ニコル状態とし、後述の 2・2・2・1 節を考慮した配置とする。微粒子移動の様子は偏光顕微鏡に取り付けられた CCD カメラを用いて 30 frame/s でパソコンに取り込む。図 2-8 に速度分布測定方法を示す。偏光顕微鏡の焦点位置を平板間の所定の位置  $y$  に合わせ、その位置で焦点の合う微粒子を 2 次元トラバース装置を用いて探す。微粒子を視野内に捉えた状態で電圧を印加することで微粒子の運動を誘発する。電圧印加は  $0 \rightarrow V$  のパルス入力 1 回である。平板間を 12 等分した位置で、この操作を繰り返すことで平板間の速度分布を得る。電圧印加には直流安定化電源(PMC35-3A: 株式会社菊水電子工業)を使用した。なお、各測定位置で同一条件の測定を 10 回繰り返した。

実験条件は、平板間隔  $H = 25, 50 \mu\text{m}$ 、印加電圧  $V = 5, 10 \text{ V}$ 、ツイスト角  $\phi_w = 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ 、および相対チルト角  $\theta_w = 0, 85^\circ$  ( $\theta(0) = 5^\circ$ ) である。各パラメータの速度分布に与える影響を調べるため、ある、パラメータに注目したとき、他のパラメータをそれらの代表値 ( $H = 50 \mu\text{m}$ 、印加電圧  $V = 5 \text{ V}$ 、ツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$ 、およびチルト角  $\theta(0) = 5^\circ$ 、相対チルト角  $\theta_w = 0^\circ$ ) に固定する。なお、室温  $25^\circ\text{C}$  で実験を行った。

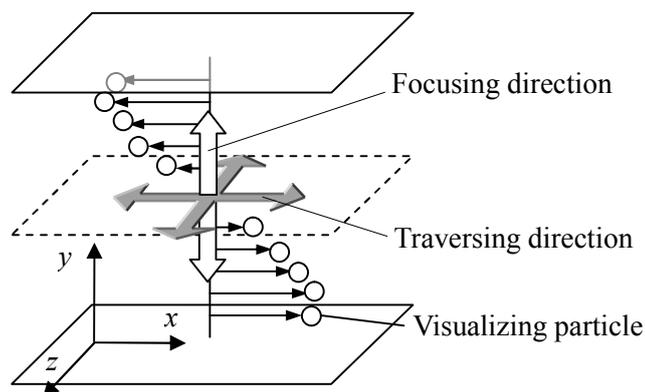


Fig. 2-8 Procedure of measuring velocity profile between parallel plates

## 2・2・2 実験精度の検討

### 2・2・2・1 複屈折の考慮

液晶は光学的異方性を有するので、分子の配向方向によって液晶の屈折率は変化する。5CB は光学的に一軸性を有し、分子の向きによる屈折率の違いによって、入射した光は 2 つの屈折光に分光される。入射光に対して直進する光が常光、入射光とずれる光が異常光である。液晶分子の屈折率の差は電場を印加した際に生じる液晶分子の回転に伴い変化する。そのため、異常光の光路の変化によって可視化微粒子の正確な位置の測定が困難となる。したがって、セルを通過した出射光からの異常光の除去が必要となる。入射光の振動方向が液晶の光学軸方向(5CB では長軸方向)に対して垂直になるよう配置することで出射光から異常光を除去<sup>(21)</sup>することができる。そのため、図 2-9 のように偏光顕微鏡の偏光子と下部ガラス板の配向方向が垂直になるように実験セルを設置した。

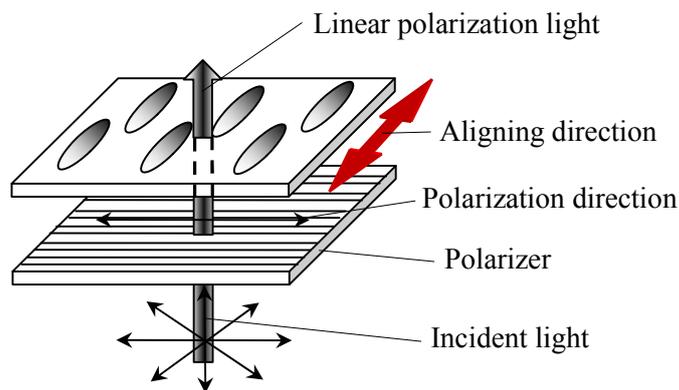


Fig. 2-9 Eliminate of the birefringence effect

## 2・2・2・2 屈折率の考慮

偏光顕微鏡の焦点位置を所定の深さ位置  $y$  に合わせるとき、媒体の屈折率の違いを考慮する必要がある。ガラスの屈折率( $n_1 = 1.53$ )と液晶の屈折率( $n_2 = 1.53$ )<sup>(22)</sup>より、図 2-10 に示すような顕微鏡の目盛りによる微粒子の見かけの位置  $y'$  と実際の位置  $y$  の関係を導出する。すなわち、

$$y' = y \times 1.53$$

である。

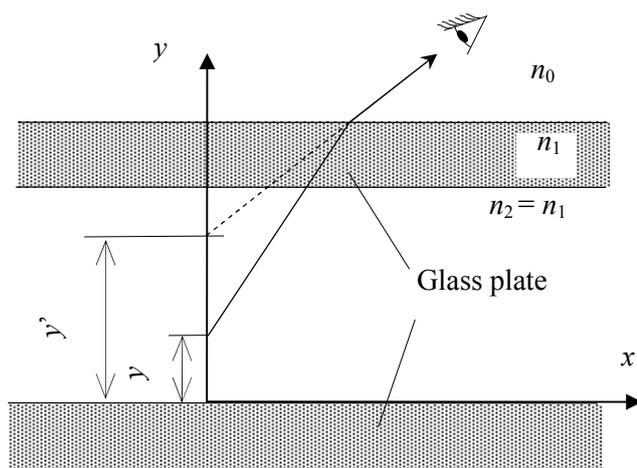


Fig. 2-10 Correction of particle position

### 2・2・2・3 空間分解能

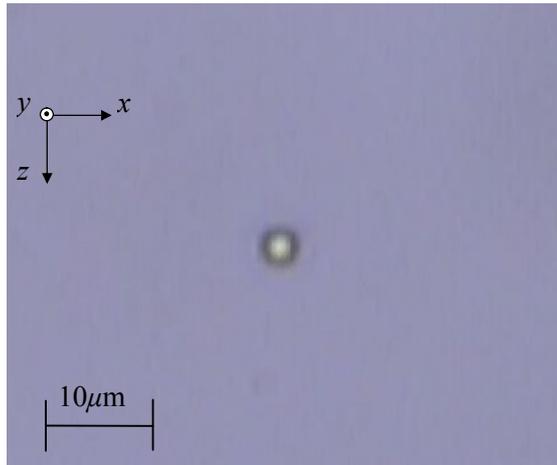
対物レンズ 40 倍での CCD カメラの撮像領域は  $120 \times 90 \mu\text{m}$ , 画素数は  $640 \times 480$  ドットであるので,  $x$ - $z$  平面内の空間分解能はおよそ  $0.2 \mu\text{m}$  である. 一方, 平板間の深さ方向( $y$  方向)の位置決め精度は, 顕微鏡の最小目盛り, 顕微鏡の被写界深度, および可視化微粒子の直径に依存する. 本研究で使用した顕微鏡の最小目盛りおよび被写界深度はそれぞれ  $1 \mu\text{m}$  ならびに  $2.3 \mu\text{m}$ , 微粒子の直径は  $2.5 \mu\text{m}$  であり, 焦点合わせは目視で行われていることから, 本研究の位置決め精度は微粒子径程度の誤差を有すると考えられる.

### 2・2・2・4 画像解析

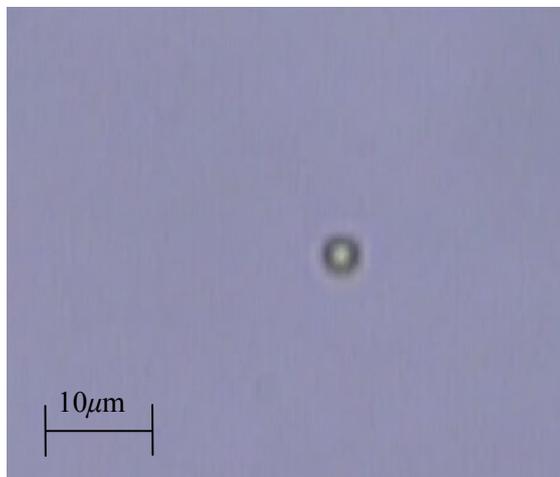
図 2-11 は加電圧  $V=5 \text{ V}$ , ツイスト角  $\phi_w=0^\circ$  の場合の, 可視化実験時の微粒子の移動の様子を示したものである. 図 2-11(a)は電場印加前の状態, 図 2-11(b)は電場印加後の状態を示す. 図より, 微粒子は電場印加後, およそ  $8.4 \mu\text{m}$  移動していることがわかる.

図 2-12 は図 2-11 の結果に関して微粒子の重心位置を, 画像解析を用いて取得した結果である. 図 2-12 上図は微粒子の電場印加後からの位置  $l$  の時間変化を示す. 電場印加開始時刻は  $t=0 \text{ s}$  である. 上図は微粒子が電場印加後およそ  $0.2 \text{ s}$  で移動を開始しおよそ  $0.8 \text{ s}$  で停止することを示す. 下図は  $l$  のこう配で, 二次中心差分で求めた速度  $u$  の時間変化を示す. 速度  $u$  は  $t=0.4 \text{ s}$  で最大速度  $32 \mu\text{m/s}$  に達する.

平板間背流の速度分布はこの最大速度を深さ方向に取得することで得る. なお, 実験結果は 2・4 節で数値計算とともに示す.



(a)



(b)

Fig. 2-11 Motion of the particle

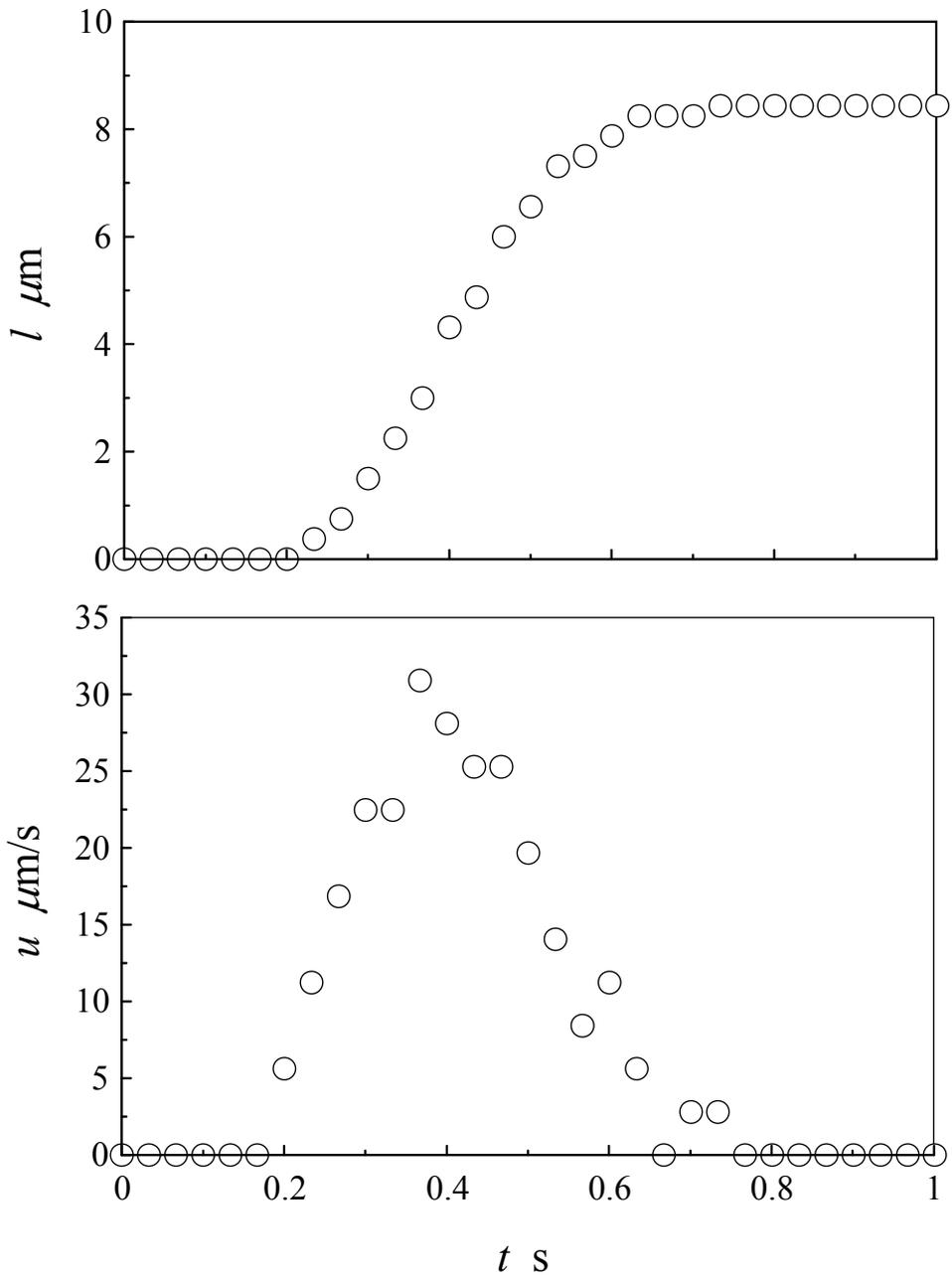


Fig. 2-12 Motion of a particle

## 2・3 背流の予測手法(数値シミュレーション)

電場印加時における背流の Leslie-Ericksen 連続体理論を用いた<sup>(23), (24), (25)</sup>数値シミュレーションについて、既報<sup>(26)</sup>が詳細に述べているので、本章では概略のみを記述する。

### 2・3・1 支配方程式

電場作用下における液晶の等温流れを記述する基礎式は以下の通りである。

- ・連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2.1)$$

- ・運動方程式

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right\} = (\varepsilon_1 \mathbf{E} + \Delta \varepsilon \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} \mathbf{n}) \cdot (\nabla \mathbf{E}) - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2.2)$$

- ・偏差応力テンソル

$$\boldsymbol{\tau} = \alpha_1 \mathbf{n} \mathbf{n} \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} + \alpha_2 \mathbf{n} \mathbf{N} + \alpha_3 \mathbf{N} \mathbf{n} + \alpha_4 \mathbf{A} + \alpha_5 \mathbf{n} \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} + \alpha_6 \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \mathbf{n} - \frac{\partial F}{\partial \nabla \mathbf{n}} \cdot (\nabla \mathbf{n})^T \quad (2.3)$$

- ・角運動方程式

$$\mathbf{n} \times \left\{ \Delta \varepsilon \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} \mathbf{E} - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}} + \nabla \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \nabla \mathbf{n}} \right) + (\alpha_3 - \alpha_2) \mathbf{N} + (\alpha_6 - \alpha_5) \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \right\} = 0 \quad (2.4)$$

- ・ディレクタの弾性歪みに基づく自由エネルギー密度

$$F = \frac{1}{2} \left\{ K_1 (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_2 (\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + K_3 |\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n}|^2 \right\} \quad (2.5)$$

- ・ディレクタの相対角速度ベクトル

$$\mathbf{N} = \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{n} - \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{n} \quad (2.6)$$

・変形速度テンソル

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2} \{ (\nabla \mathbf{v})^T + \nabla \mathbf{v} \} \quad (2.7)$$

・渦度テンソル

$$\mathbf{\Omega} = \frac{1}{2} \{ (\nabla \mathbf{v})^T - \nabla \mathbf{v} \} \quad (2.8)$$

ここで  $\mathbf{v}$  は速度ベクトル,  $p$  は圧力,  $\mathbf{n}$  はディレクタである. 表 2-1 で定義した物性値および係数以外に,  $\mathbf{E}$  は電場ベクトル,  $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$  は誘電異方性である.

## 2・3・2 境界条件および計算方法

計算領域を図 2-13 に示す. 時刻  $t=0$  で  $y$  方向にのみ電圧  $V$  が印加されるので

$$\mathbf{V} = (0, V, 0)^T \quad (2.9)$$

となり, 平板間中の配向ベクトル  $\mathbf{n}$  は

$$\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)^T = (\cos\theta \sin\phi, \cos\theta \cos\phi, \sin\theta)^T \quad (2.10)$$

で表される. このとき, 平板間中に発生する背流の速度ベクトル  $\mathbf{v}$  は  $y$  方向成分のみが 0 となるため

$$\mathbf{v} = (u, 0, w)^T \quad (2.11)$$

と表される.

境界条件に関しては厳密に平板端面の影響を考慮に入れた三次元計算を行うべきである. しかし, 平板面積が平板間隔  $H$  に比べて十分に広いことから, 近似的に平板間隔方向の一次元計算が可能である. したがって, 境界条件は上下壁面のみで十分である. 速度場に関する境界条件は壁面部で滑り無し(すなわち  $u(0) = u(H) = w(0) = w(H) = 0$ ), 分子配向場に関する境界条件は計算パラメータである壁面部のツイスト角  $\phi_w$  とプレチル

ト角  $\theta_w$  である.

基礎式の離散化には二次精度の中心差分法を, 時間方向の積分には二次精度のルンゲ・クッタ法を用いた. 予備計算よりメッシュサイズは  $\Delta y = H/100$ , 時間ステップは  $\Delta t = 10^{-6} \text{ s}$  とした. 初期値に関して, 速度場は計算領域全体で  $\mathbf{v} = \mathbf{0}$ , 配向場は無電場時の平衡配向状態とした. 計算パラメータは実験パラメータと同一の条件を用いた.

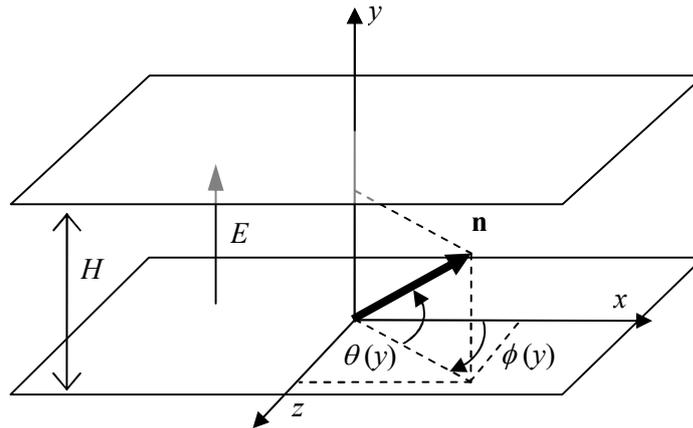
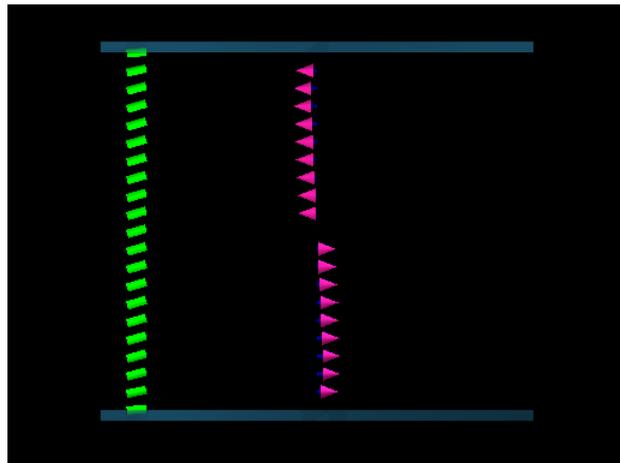
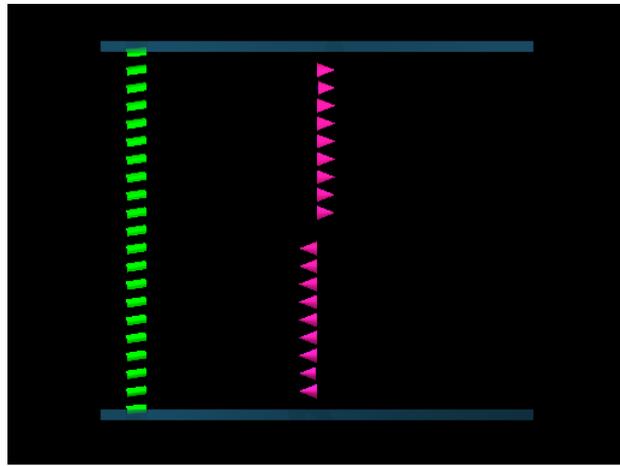
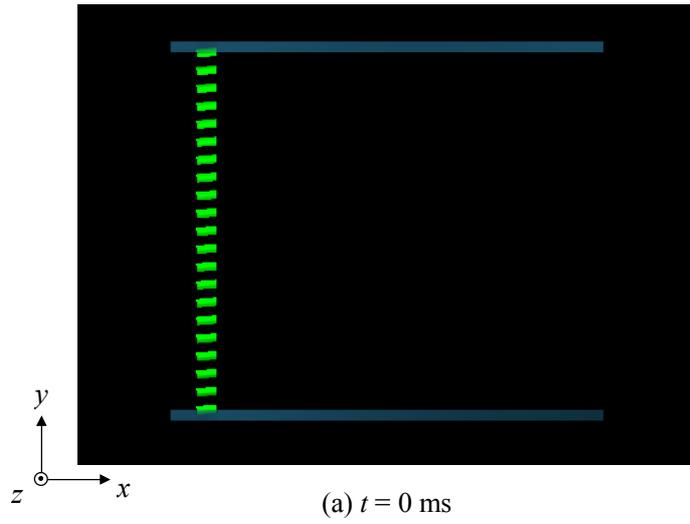
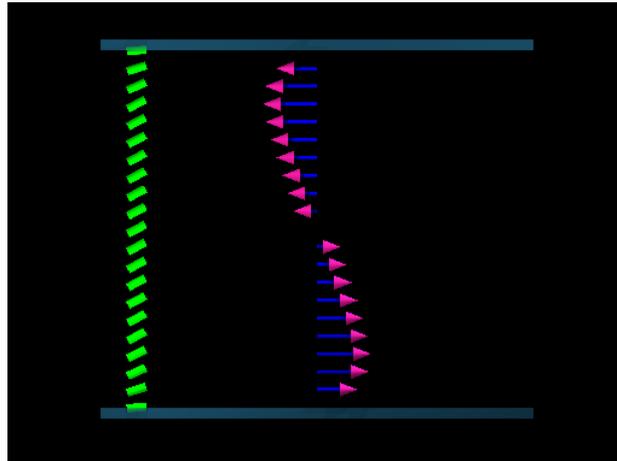


Fig. 2-13 Coordinate System

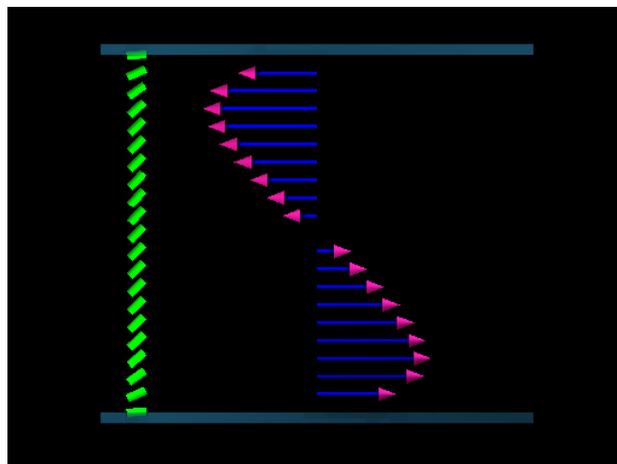
図 2-14(a)から(g)にかけて数値計算結果の一例を示す. この例では得られた数値計算結果を三次元描画ソフト POV-Ray を用いて視覚的に理解しやすいようにしている. 計算条件, 印加電圧  $V = 5 \text{ V}$ , 平板間隔  $H = 50 \mu\text{m}$ , 相対チルト角  $\theta_w = 0^\circ (\theta(0) = 5^\circ)$ , ツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$  のときの数値計算結果を示す. 図の左側の短冊状のオブジェクトは液晶の各深さ位置でのディレクタ  $\mathbf{n}$  の向きを示し, 図の右側に平板間に生じる各時刻での速度分布を示す. 図より電場印加後から  $t = 100 \text{ ms}$  後に壁面近傍を除いて, ディレクタの回転が見られ, 速度の発生が認められる. さらに,  $t = 200 \text{ ms}$  ではバルクのディレクタはほとんどが  $45^\circ$  以上に傾いていることがわかる. それ以降, 電場を印加し続けると, ディレクタは  $\theta = 90^\circ$  に近づくように配向するが,  $t = 250 \text{ ms}$  を超えたあたりから速度は減少する傾向を示す. 電場印加時に発生する背流はディレクタの回転に伴うものであるため, ディレクタが電場印加時の安定配向状態(すなわち  $\theta = 90^\circ$ )になった時点で背流は発生しなくなる.

背流の可視化実験での速度分布取得方法が各深さ位置での微粒子の最大の移動速度を取得したものであるため, 数値シミュレーション結果もこのような速度分布の時間変化の結果をもとに, 各深さ位置での最大速度を取得し比較を行う.

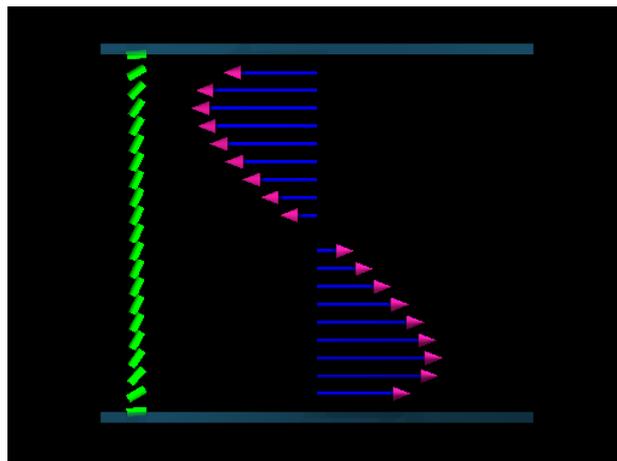




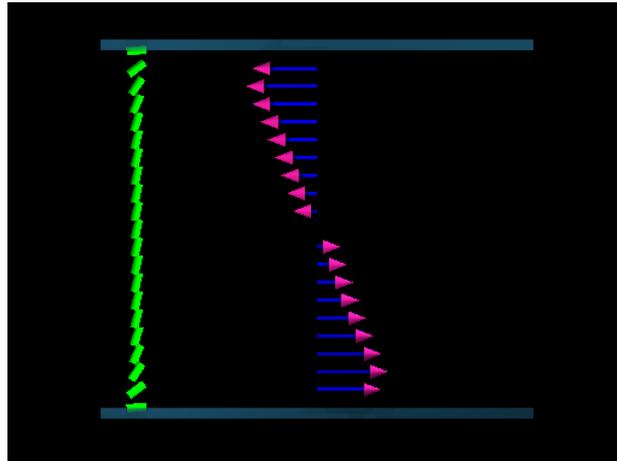
(d)  $t = 150$  ms



(e)  $t = 200$  ms



(f)  $t = 250$  ms



(g)  $t = 300 \text{ ms}$

Fig. 2-14 Change in velocity profiles with time

## 2・4 結果および考察

前節での可視化実験および数値シミュレーションから得られた結果を以下に示す. 各節ではそれぞれのパラメータについて議論する.

### 2・4・1 ツイスト角の影響

図 2-15 から図 2-23 にかけて, ツイスト角  $\phi_w$  を  $\phi_w = 0, 45, 90, 135, 180^\circ$  に変化させたときの電場印加時における平行平板間液晶流動測定の実験結果の一例を示す. 実験条件はすべて印加電圧  $V = 5 \text{ V}$ , 平板間隔  $H = 50 \mu\text{m}$ , 相対チルト角  $\theta_w = 0^\circ (\theta(0) = 5^\circ)$  である. 各図の縦軸は微粒子の平板間深さ位置  $y \mu\text{m}$  を示し, 横軸は各深さ位置における微粒子の位置変化  $l \mu\text{m}$  を示す. 電場印加後  $t = 0 \text{ ms}$  から  $33 \text{ ms}$  ごとに  $t = 231 \text{ ms}$  までを表示した. 2・2・1・2 節で述べたように平板間の速度分布の測定は各深さ位置の微粒子の移動の様子を深さ方向にトラバースすることで取得しているため, 各図の深さ方向の結果は時間的に空間的に連続性を持っていないといえる. 一方, ただ一つの微粒子の移動を追尾することから各深さ位置では時間方向に連続性を持つ. なお, どの実験結果も  $t = 0$  が電場印加開始時刻である.

図 2-15 はツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$  のときの実験結果の一例である. 電場印加後  $t = 33 \text{ ms}$  で, セル上部領域に位置する微粒子は負方向に移動を開始し, セル下部領域に位置する微粒

子は正方向に移動を開始する。その後、時間の経過とともに微粒子は移動していくが、セル壁面近傍とセル流路中央に位置する微粒子は  $t = 132 \text{ ms}$  で停止する傾向を示す。その後、 $y = 10, 35 \mu\text{m}$  近傍の微粒子は移動し続け、最終的に  $y = 25 \mu\text{m}$  を中央とする、反対称な S 字分布となることがわかる。なお、ツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$  のみ  $z$  方向の移動が確認されなかったため  $z$  方向の結果は載せていない。

図 2-16, 2-17 はツイスト角  $\phi_w = 45^\circ$  のときの実験結果の一例である。図 2-16 と図 2-17 はそれぞれ  $x$  方向および  $z$  方向を示す。図 2-16 は図 2-15 と同様に微粒子が移動していくが、微粒子の移動方向の切り替わり点が  $y = 20 \mu\text{m}$  に位置し、 $t = 231 \text{ ms}$  では負方向の移動量が大きくなる傾向が得られた。一方、図 2-17 では  $t = 33 \text{ ms}$  で  $y = 45 \mu\text{m}$  で微粒子の負方向への移動が確認でき、その他の箇所ではすべて正方向に移動していることがわかる。その後、時間の経過とともに微粒子は移動を続け、 $t = 231 \text{ ms}$  で負方向の移動量が小さく、正方向の移動量が大きい移動量分布を示す。

図 2-18 と図 2-19 はツイスト角  $\phi_w = 90^\circ$  のときの  $x$  方向、 $z$  方向移動量を示す。図 2-18 では図 2-16 の傾向がより顕著になり、負方向の移動量が大きくなる。図 2-19 では移動方向の切り替わり位置が  $y = 32 \mu\text{m}$  に位置し、セル中央部に寄っていることがわかる。

図 2-20 と図 2-21 はツイスト角  $\phi_w = 135^\circ$  のときの  $x$  方向、 $z$  方向の微粒子移動の様子を示す。移動方向の切り替わり点が  $y = 8 \mu\text{m}$  付近に位置し、負方向に移動する微粒子がセルの大半を占める。また、 $y = 8 \mu\text{m}$  に位置する微粒子に注目すると、 $t = 99 \text{ ms}$  まで負方向に移動していることが確認できるが、 $t = 132 \text{ ms}$  では微粒子が正方向に移動し始めていることがわかる。このことから、この位置の流動は電場印加直後に負方向に生じ、その後時間経過とともに正方向の流動に変化したことがわかる。図 2-21 では速度の切り替わり点がさらにセル中央に寄っており、 $y = 32 \mu\text{m}$  に位置する。

図 2-22 と図 2-23 はツイスト角  $\phi_w = 180^\circ$  での  $x$  方向、 $z$  方向に関する微粒子の移動量の結果である。図 2-22 では微粒子の移動方向はすべての深さ位置で負方向になっており、 $y = 25 \mu\text{m}$  の位置で最大の移動量  $l = -7 \mu\text{m}$  を有する一方向分布となっていることがわかる。一方、図 2-23 では移動量分布は図 2-15 のような S 字分布形状になっており、 $y = 25 \mu\text{m}$  を中心にセル上部領域では負方向に、セル下部領域では正方向に移動している。

これらの結果はツイスト角が付与されたことによる配向分布の変化が平行平板間内で発生する背流の大きさを微粒子の移動量から間接的に示しているだけであり、実際どのような速度分布が平行平板間に生じているか示しているものではない。また、深さ方向に連続性を持たないため、大まかな分布形状しか明らかにできない。さらに、各深

さ位置で  $x$ - $z$  面での測定位置が異なるため、深さ方向にばらつきが生じている。そのため、可視化実験をすべての実験条件で複数回行うことで  $x$ - $z$  面での測定位置による影響を緩和し、さらに結果から得られた微粒子の移動から速度を取得、整理する必要がある。以下にその結果を示す。

図 2-24 から図 2-28 にかけて印加電圧  $V = 5 \text{ V}$ 、平板間隔  $H = 50 \text{ }\mu\text{m}$ 、相対チルト角  $\theta_w = 0^\circ$  ( $\theta(0) = 5^\circ$ ) の条件で、ツイスト角  $\phi_w$  を  $\phi_w = 0, 45, 90, 135, 180^\circ$  に変化させたときの実験結果および数値計算結果を示す。図の縦軸は平板間位置を示し、横軸は各深さ位置の微粒子の速度、すなわち背流の流速を示す。各図ともに  $x$  軸方向流速  $u_m$  (添え字の  $m$  は最大速度の意味)、 $z$  軸方向流速  $w_m$  をそれぞれ併記している。各図のプロットは 10 回の実験で得られた平均値をエラーバーとともにプロットしたものである。図中の曲線は L-E 理論より得られた数値シミュレーション結果である。ツイスト  $\phi_w = 0^\circ$  のみ  $z$  方向の流動が発生しなかったため ( $w_m = 0 \text{ }\mu\text{m/s}$ )、 $z$  方向の結果を記載していない。

図 2-24 ( $\phi_w = 0^\circ$ ) に注目すると、速度分布形状は  $y = 25 \text{ }\mu\text{m}$  を中央に回転対称な S 字分布形状になっていることがわかる。この傾向は実験結果、数値計算結果ともに同じである。速度の最大値に注目すると実験結果が  $u_m = 14 \text{ }\mu\text{m/s}$  であり、数値計算結果は  $u_m = 26 \text{ }\mu\text{m/s}$  とそれぞれの間に 2 倍程度の差がある。

図 2-25(a), (b) ( $\phi_w = 45^\circ$ ) の (a) は  $x$  方向速度分布を (b) は  $z$  方向速度を示す (以降も同様である)。  $\phi_w = 0^\circ$  の場合と異なり、 $z$  方向の流動が発生していることが確認できる。図 2-25(a) に関して、実験結果の方でははっきりと確認できないが、数値計算結果では平板間中の速度が切り替わる点 (すなわち  $u_m = 0 \text{ }\mu\text{m/s}$ ) がセル中央よりも下側  $y = 22 \text{ }\mu\text{m}$  に位置していることから、負方向の流動の深さ方向領域が広がっていることがわかる。また、速度の最大値に関しても正方向の流動が  $u_m = 22 \text{ }\mu\text{m/s}$  と、 $\phi_w = 0^\circ$  のときと比較して減少しており、逆に負方向の流動が  $u_m = 27 \text{ }\mu\text{m/s}$  と増加していることがわかる。次に図 2-25(b) に関して、速度分布形状は負方向流動の領域が狭い歪んだ S 字分布となっている。速度の切り替わる点は  $y = 38 \text{ }\mu\text{m}$  に位置している。速度の最大値は実験値が平板間下部領域で  $u_m = 10 \text{ }\mu\text{m/s}$ 、数値シミュレーション結果が  $u_m = 19 \text{ }\mu\text{m/s}$  とここでも 2 倍程度の差が生じている。

図 2-26(a), (b) ( $\phi_w = 90^\circ$ ) の (a) について、速度の切り替わり点はセル下側に移動し、 $y = 14 \text{ }\mu\text{m}$  に位置する。また、負方向速度の増加が確認でき、実験では  $u_m = 26 \text{ }\mu\text{m/s}$ 、数値シミュレーション結果では  $u_m = 32 \text{ }\mu\text{m/s}$  であった。同様に正方向速度の減少も確認でき、 $u_m = 14 \text{ }\mu\text{m/s}$  である。図 2-26(b) について、速度の切り替わり点は  $y = 37 \text{ }\mu\text{m}$  であり、 $\phi_w = 45^\circ$  の結果と比較して、セル中央に僅かに寄っていることがわかる。速度の最大値はセ

ル下部領域側で実験値が  $w_m = 16 \mu\text{m/s}$ 、計算値が  $w_m = 32 \mu\text{m/s}$  であり、両者の間に 2 倍程度の誤差がある。

図 2-27(a) ( $\phi_w = 135^\circ$ ) について、速度の切り替わり点はさらにセル壁面部に寄り、 $y = 8 \mu\text{m}$  に位置する。負方向速度の増加が著しく、計算値で  $u_m = 52 \mu\text{m/s}$ 、実験値で  $u_m = 44 \mu\text{m/s}$  である。一方、正方向速度は  $u_m = 6 \mu\text{m/s}$  と小さくなっている。図 2-27(b) について、速度の切り替わり点は  $y = 35 \mu\text{m}$  とさらにセル中央に寄っている。速度の最大値は  $w_m = -20, 24 \mu\text{m/s}$  とセル上部の負方向流動の発達を確認できる。

図 2-28(a), (b) ( $\phi_w = 180^\circ$ ) の(a)について、図より明らかなようにこの条件では  $x$  方向の速度分布に速度の切り替わり点が存在しない一方向流動になっている。セル中央部に速度の最大値を有し、速度の最大値はこれまでの結果と比較して非常に大きく、実験値で  $u_m = -60 \mu\text{m/s}$ 、計算値で  $u_m = -70 \mu\text{m/s}$  である。一方、図 2-28(b) について速度分布形状は図 2-28 の結果に非常によく似た反対称性を有する S 字分布形状となっていることがわかる。速度分布の最大値は実験値、計算値でそれぞれ、 $w_m = 22, 28 \mu\text{m/s}$  である。

測定値の誤差は実験条件に無関係に測定値の  $\pm 20\text{-}30\%$  であり比較的大きい。この理由として、実験セルの制作誤差、特にガラス表面に成膜された配向膜の配向膜特性によるものと考えられる。例えば、配向材料をスピコート処理する際のムラによる不均一性や、ラビング処理による配向膜への傷、埃の付着などが挙げられる。また、液晶への可視化微粒子混入による不活性イオンの析出などの影響がマイクロオーダーの計測に顕著に表れたものと考えられる。

各実験結果の実験値と計算値を比較すると、両者の間に定性的に十分な一致が認められる。しかしながら、定量的な一致に関しては両者の間に認められない。例えば  $\phi_w = 90, 135, 180^\circ$  の  $u_m$  に関する実験と計算結果において、両者は比較的満足な一致を示す、しかし、 $\phi_w = 0, 45^\circ$  の  $u_m$  や  $\phi_w = 45, 90^\circ$  の  $w_m$  に関しては両者の間に 2 倍程度の差がある。このとき、実験値は計算値を必ず下回る傾向を示す。この結果は実験セルの端面における表面張力が影響しているものと考えられる。ここで、平板端面の表面張力の影響を以下のように見積もる。流動によって生じる流れ方向の垂直応力  $\tau_{xx}$  は、数値計算より約  $0.33\text{Pa}$  である。一方、5CB の表面張力<sup>(27)</sup>は  $0.028 \text{ N/m}$  である。表面張力のたがはり成分(フープ応力)と  $\tau_{xx}$  の力のつり合い式から、流動による自由表面の変位量は約  $7 \times 10^3 \mu\text{m}$  だとわかる。この値は極めて小さく、平板間に生じる流動は平板端面での自由表面によって抑制されるため、実験値は計算値よりも小さな値になったと考えられる。

これらの結果からツイスト角  $\phi_w$  の増加は  $x$  方向流動では速度の切り替わり位置をセル中央からセル下部へと変化させる。それに伴いセル上部に生じていた負方向流動が著しく成長し、 $\phi_w = 180^\circ$  では負の流動のみの一方向流動となる。 $z$  方向流動に関してはツイスト角が生じることで  $z$  方向の流動が発生し、さらに  $\phi_w$  が増加することで速度の切り替わり点がセル中央部に寄っていく。最終的に  $\phi_w = 0^\circ$  のような反対称性を有する S

字分布形状となる．各ツイスト角の条件での最大速度をまとめると， $u_m = 13, 15, 26, 40, 60 \mu\text{m/s}$  とツイスト角の増加に伴い増加する傾向を示した．また  $z$  方向速度分布に関してはツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$  のとき速度  $w_m = 0 \mu\text{m/s}$  であったがツイスト角の増加とともに  $w_m$  の最大値は  $w_m = 0, 8, 15, 24, 21 \mu\text{m/s}$  となった．

この傾向は式(2)にあるように平行平板間中に発生する加速度がディレクタ  $\mathbf{n}$  のこう配によって決まることに起因するものと考えられる．すなわち，ツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$  では初期配向状態は  $y$  軸方向にこう配を有さないが，ツイスト角が付与されることでディレクタのこう配が生じる．これにより，電場印加時に生じる加速度が増加し，最終的に発生速度が増加したものと考えられる．

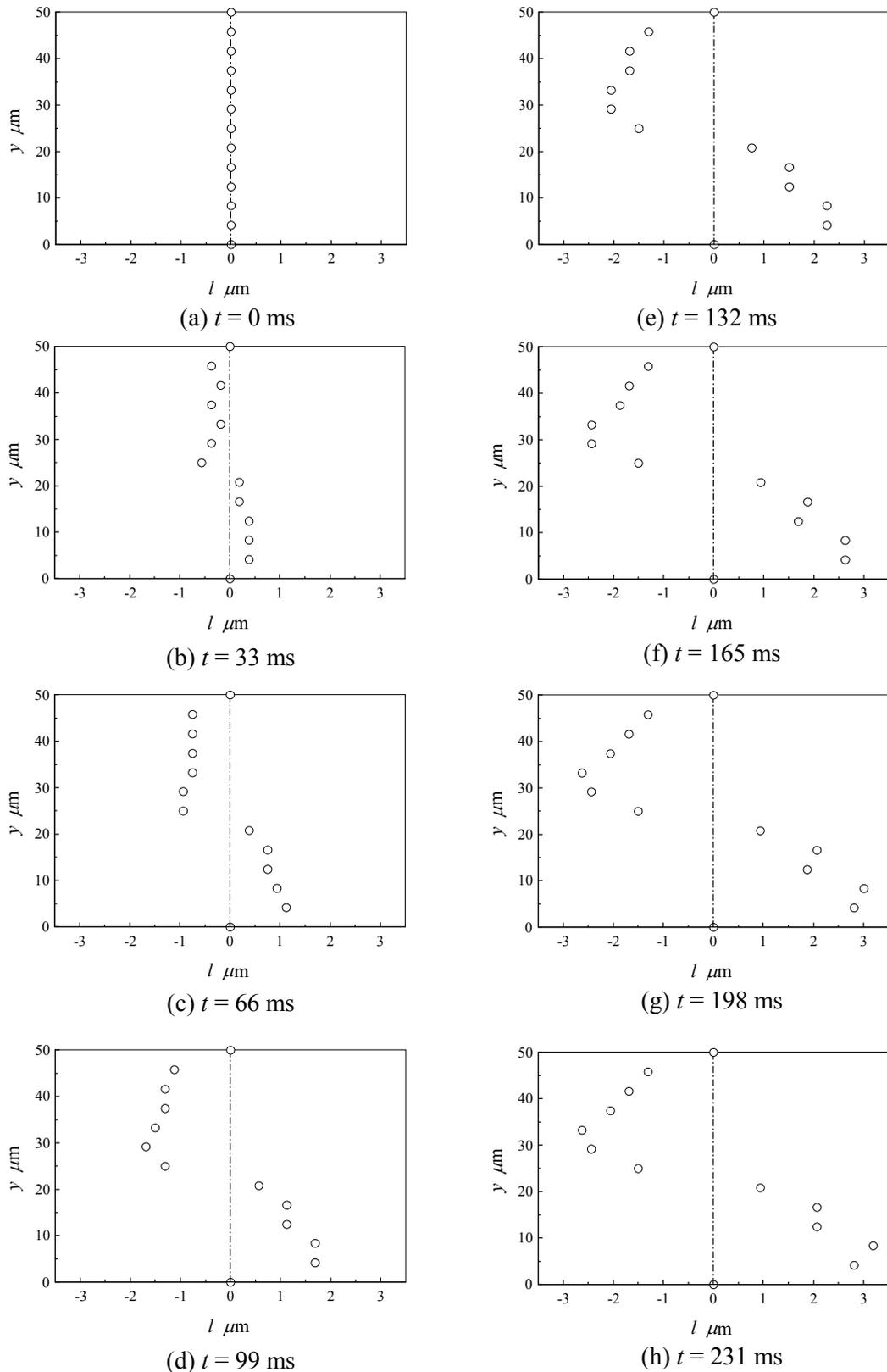


Fig. 2-15 Change in travel distance with time ( $\phi_w = 0^\circ$ )

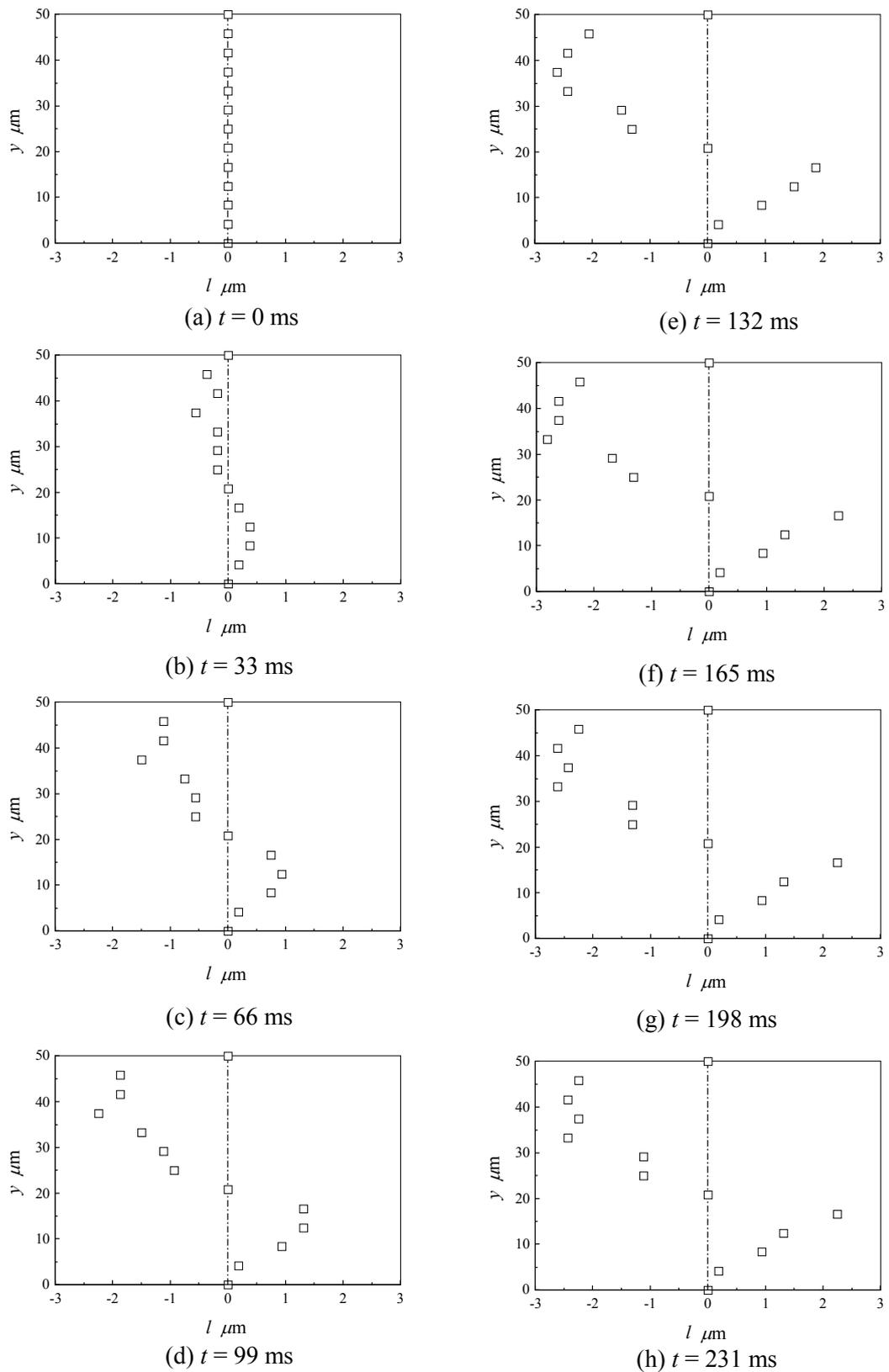


Fig. 2-16 Change in travel distance with time ( $\phi_w = 45^\circ$  x direction)

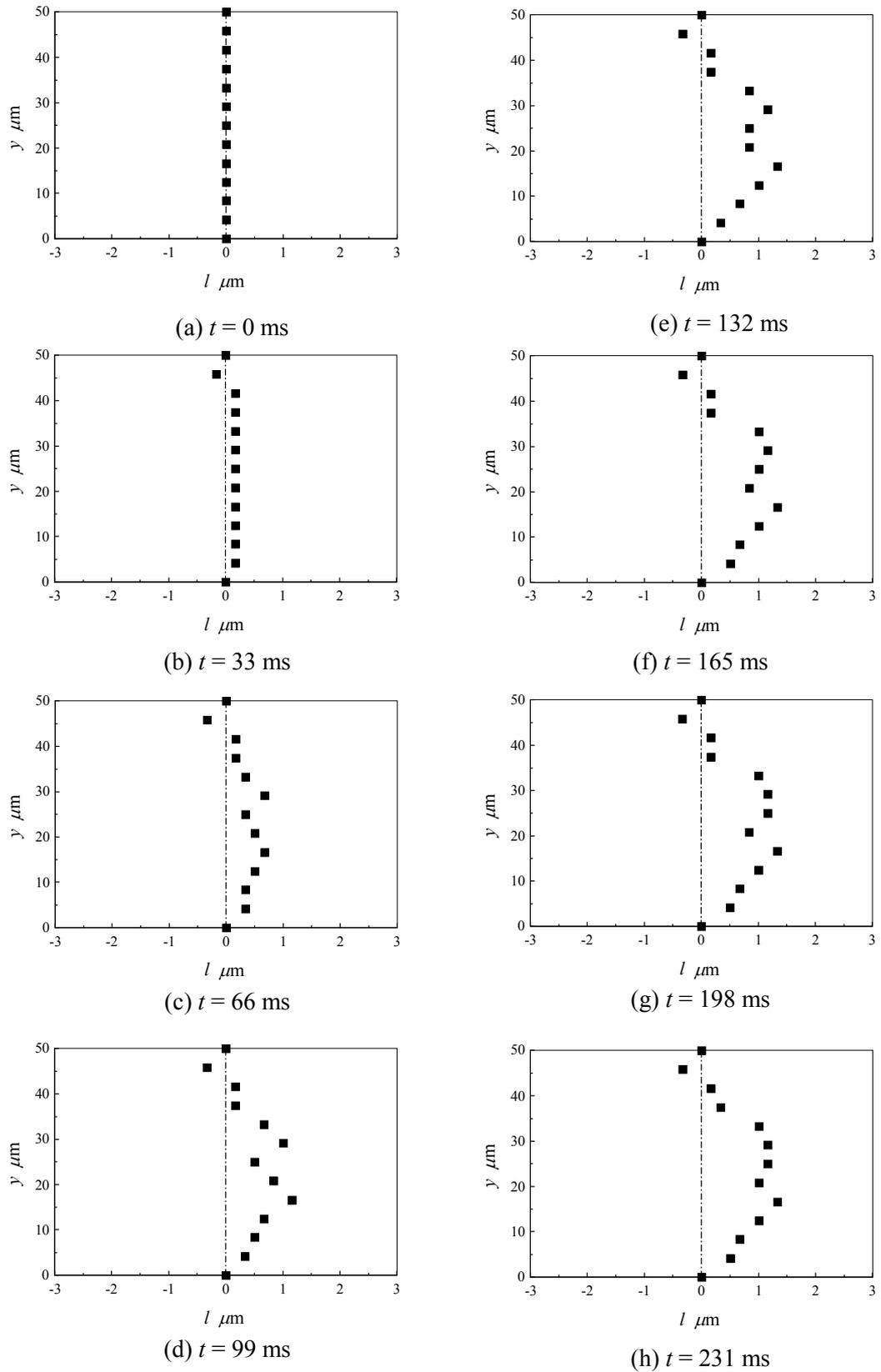


Fig. 2-17 Change in travel distance with time ( $\phi_w = 45^\circ$  z direction)

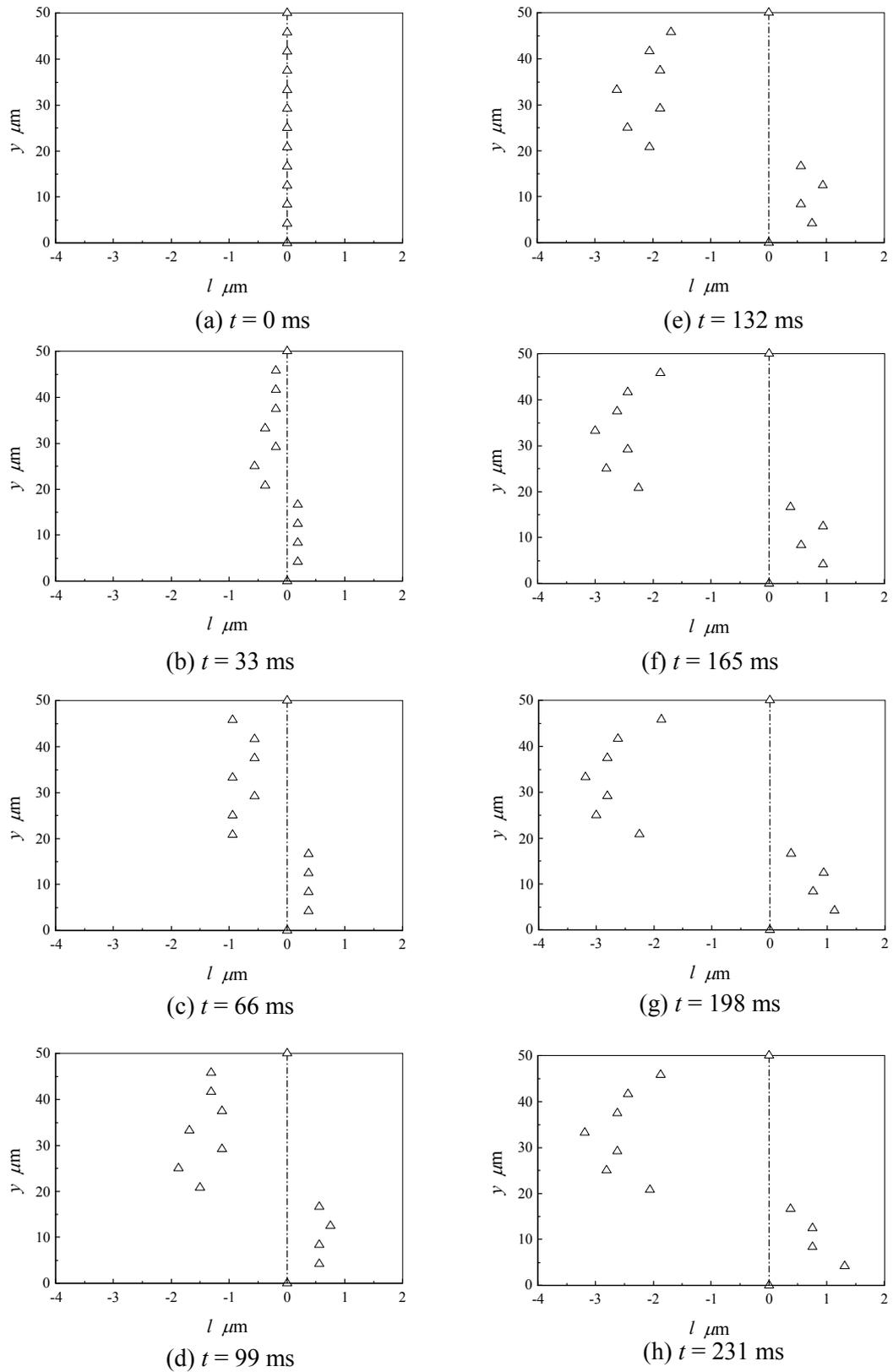


Fig. 2-18 Change in travel distance with time ( $\phi_w = 90^\circ$   $x$  direction)

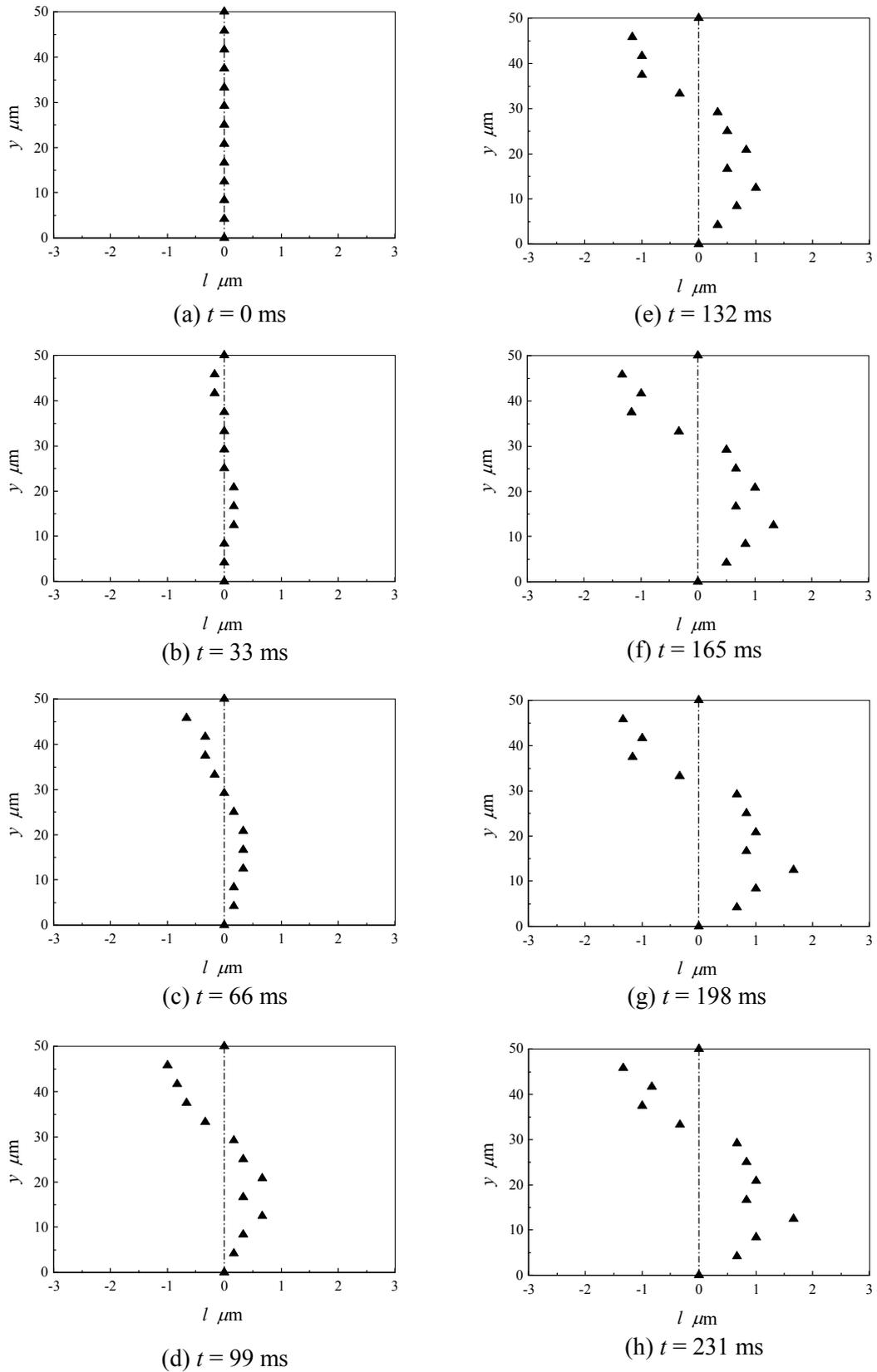


Fig. 2-19 Change in travel distance with time ( $\phi_w = 90^\circ$  z direction)

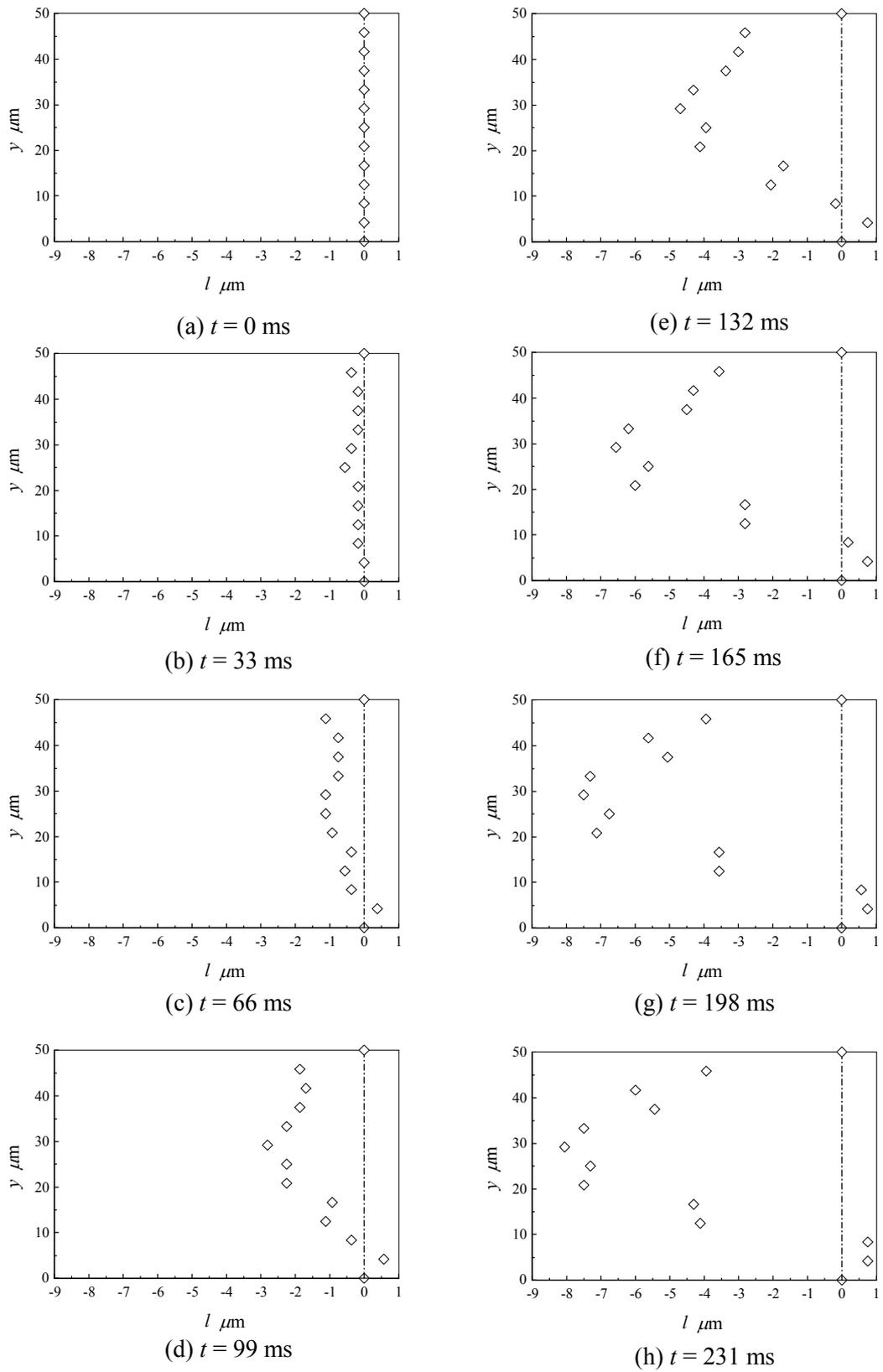


Fig. 2-20 Change in travel distance with time ( $\phi_w = 135^\circ$  x direction)

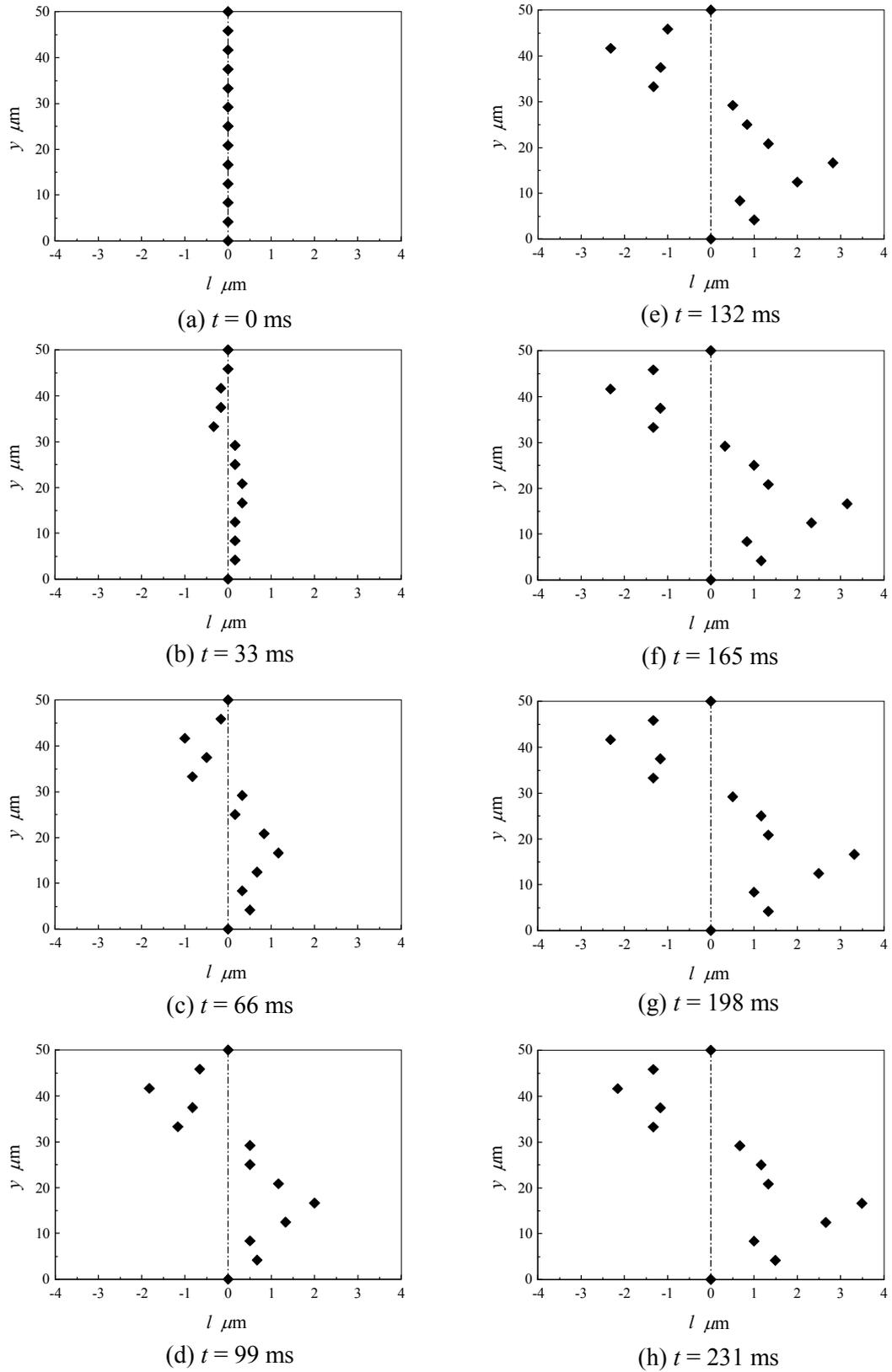


Fig. 2-21 Change in travel distance with time ( $\phi_w = 135^\circ$  z direction)

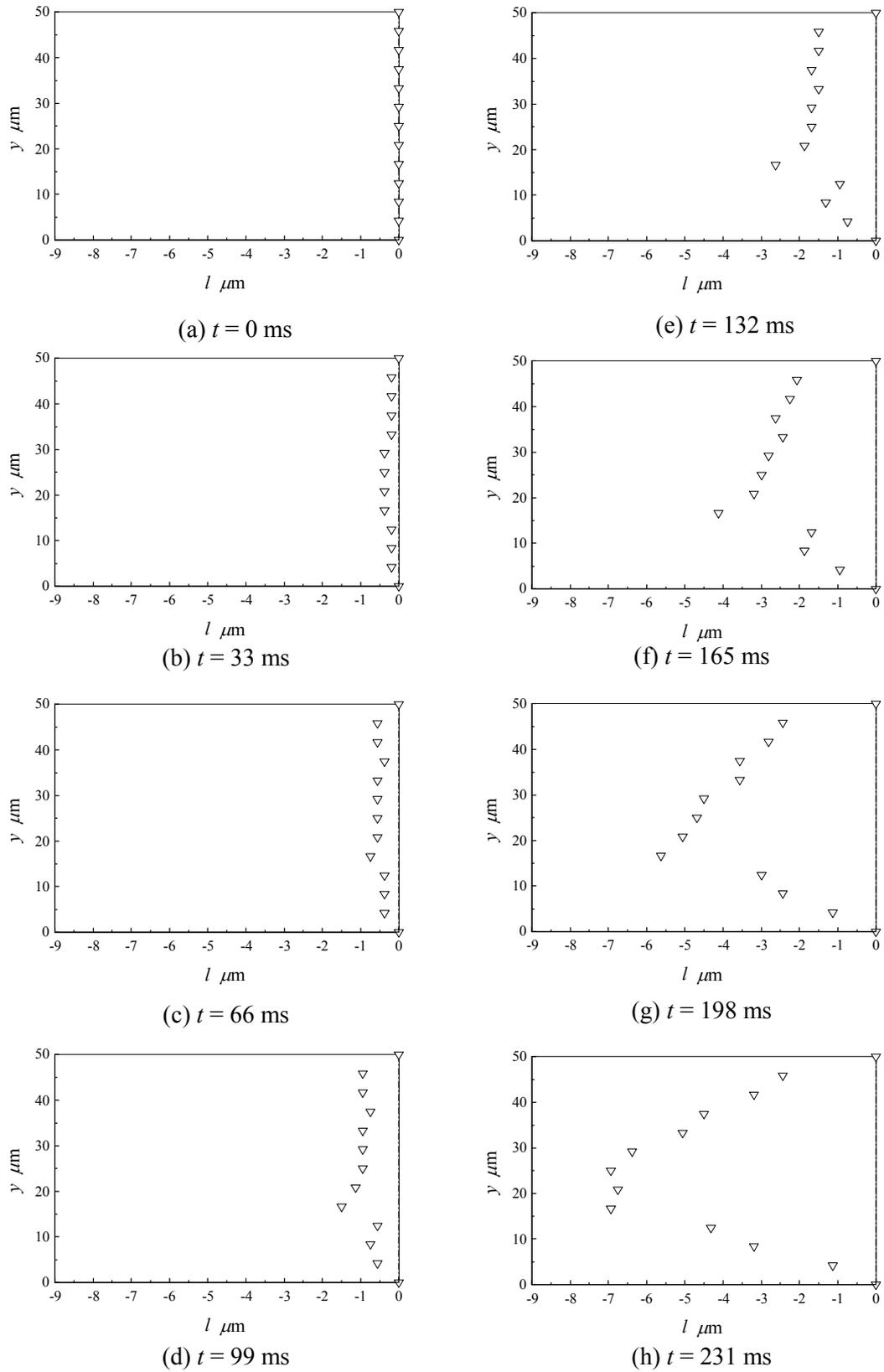


Fig. 2-22 Change in travel distance with time ( $\phi_w = 180^\circ$  x direction)

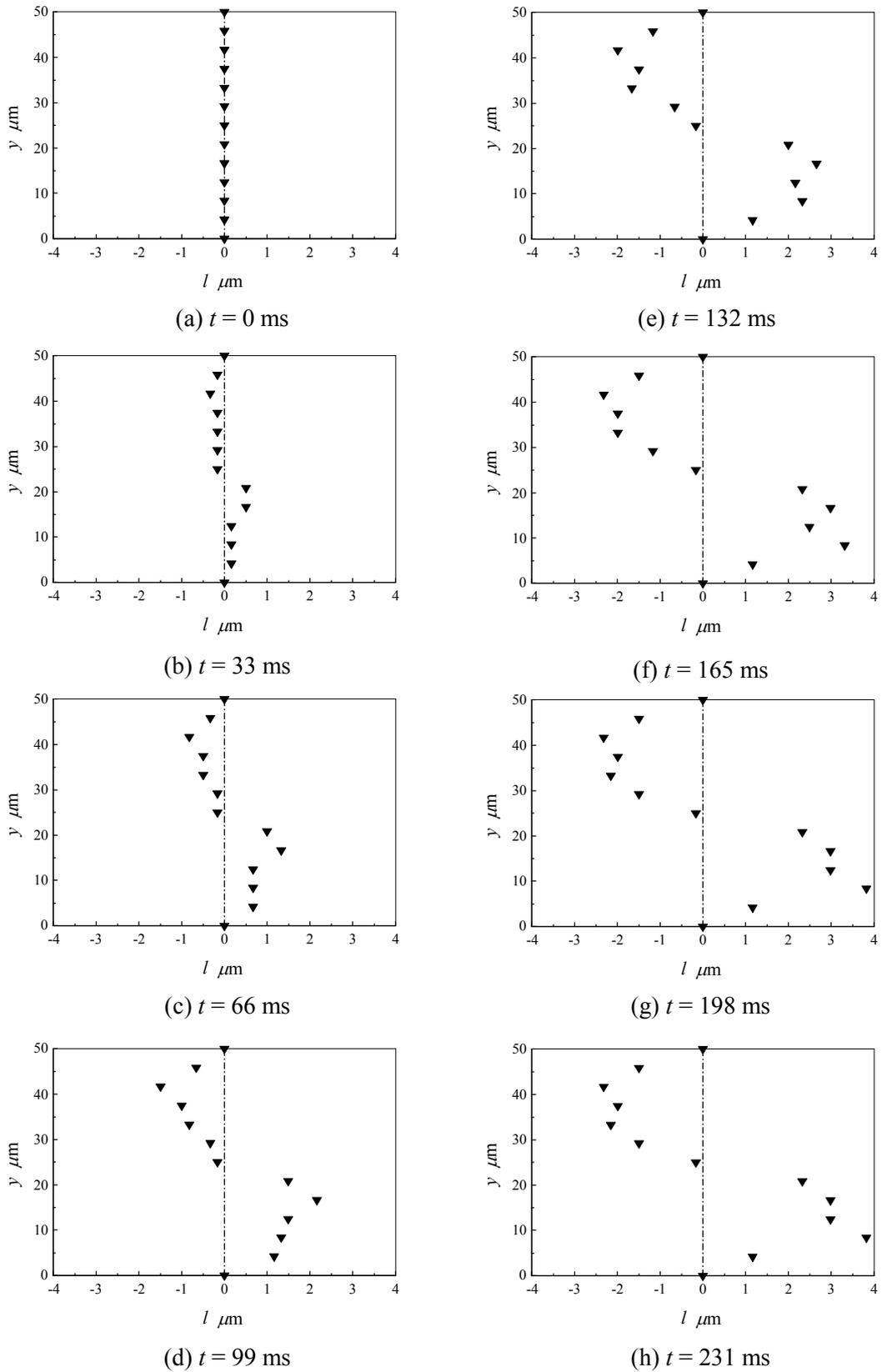


Fig. 2-23 Change in travel distance with time ( $\phi_w = 180^\circ$  z direction)

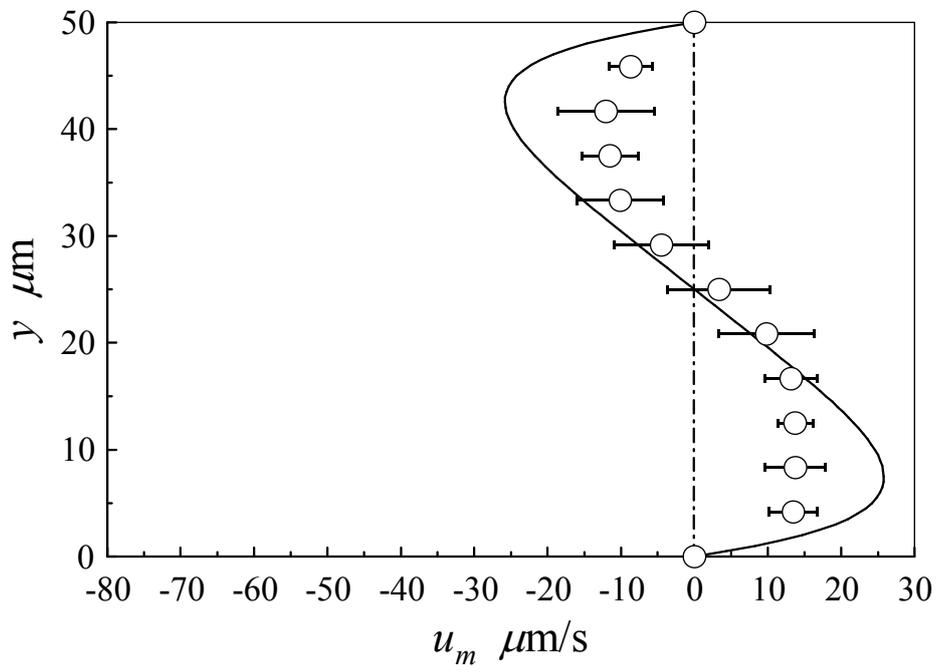
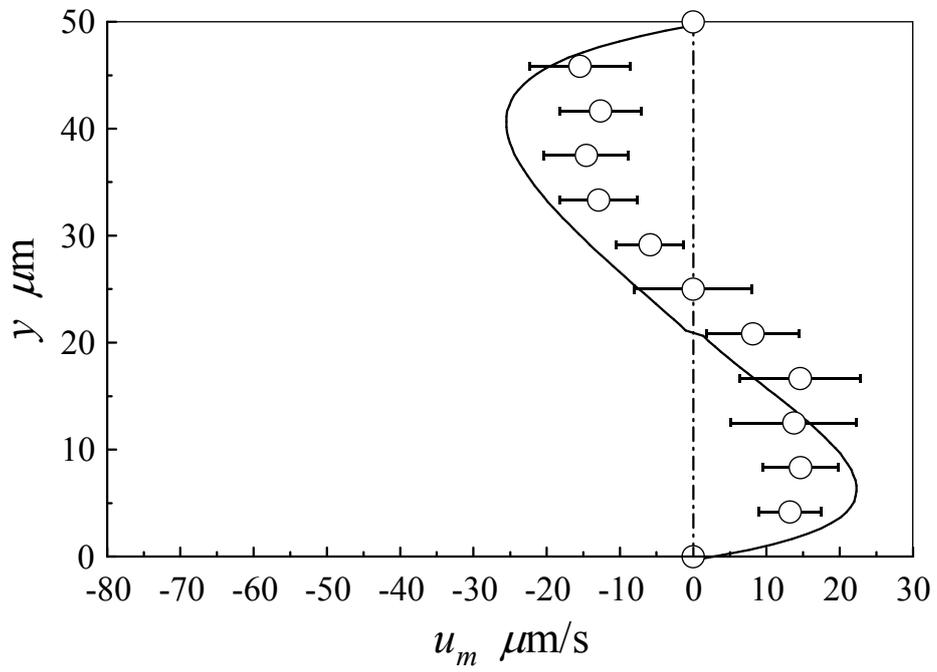
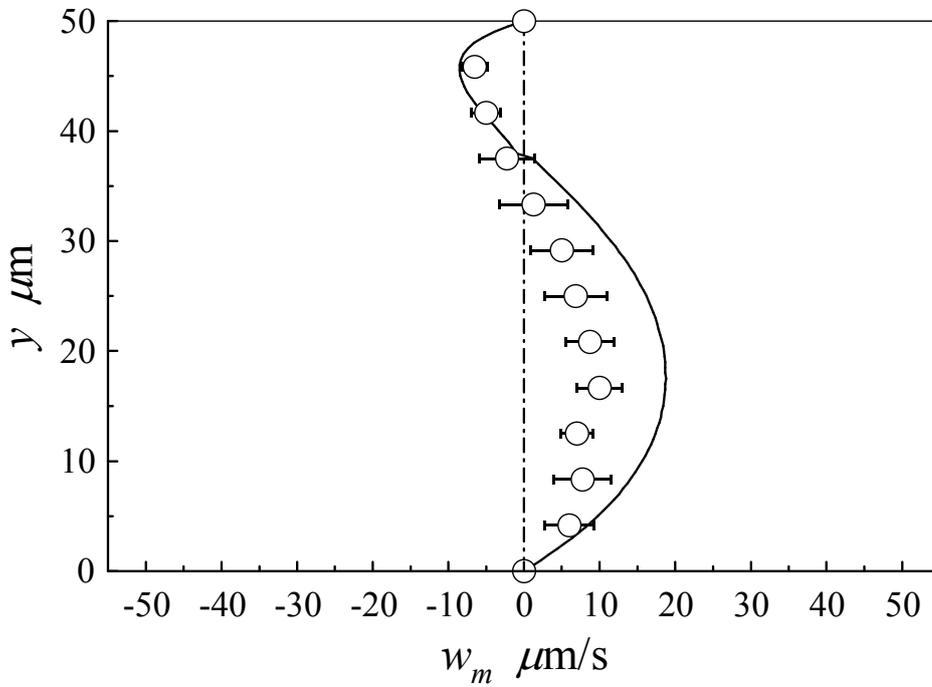


Fig. 2-24 Velocity profile ( $\phi_w = 0^\circ$   $x$  direction)

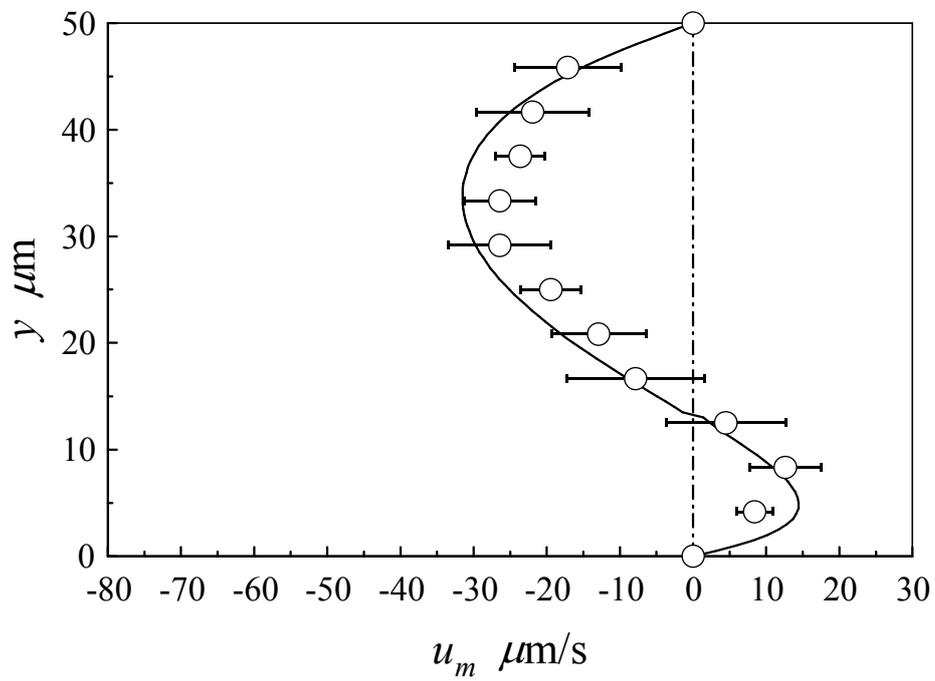


(a)

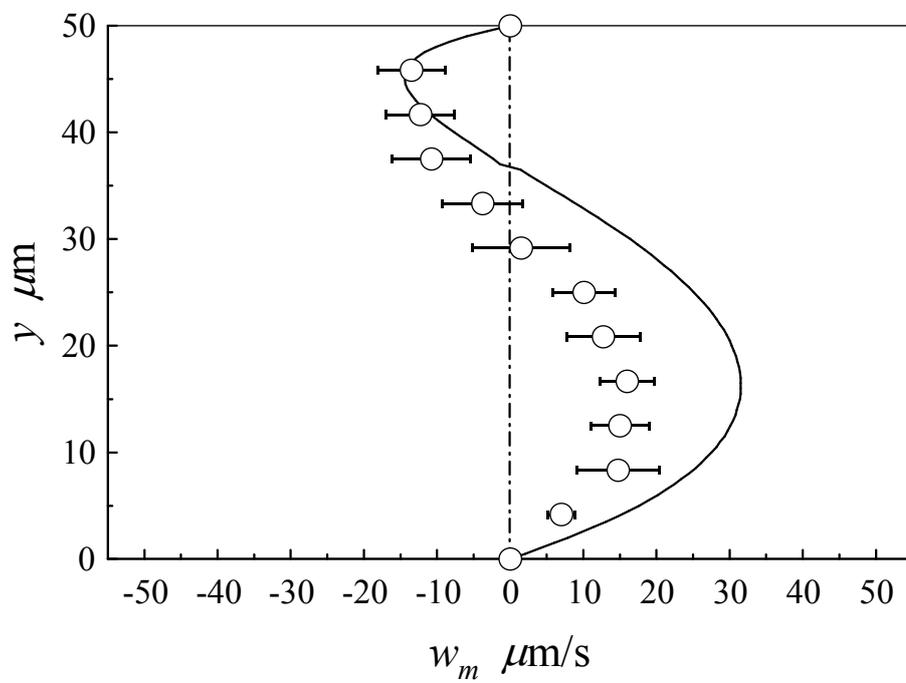


(b)

Fig. 2-25 Velocity profile ( $\phi_w = 45^\circ$ )

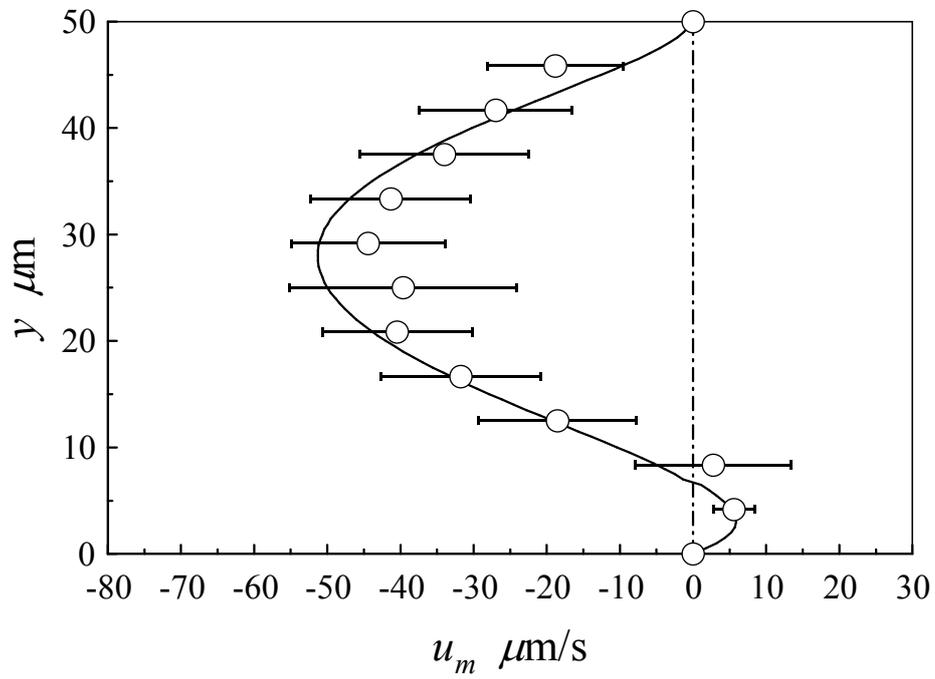


(a)

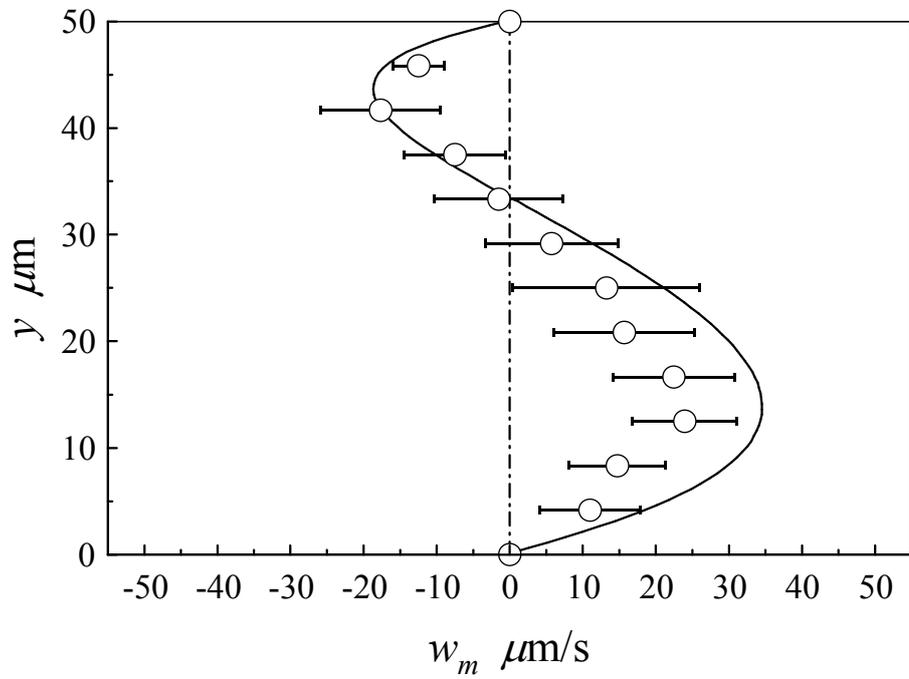


(b)

Fig. 2-26 Velocity profile ( $\phi_w = 90^\circ$ )

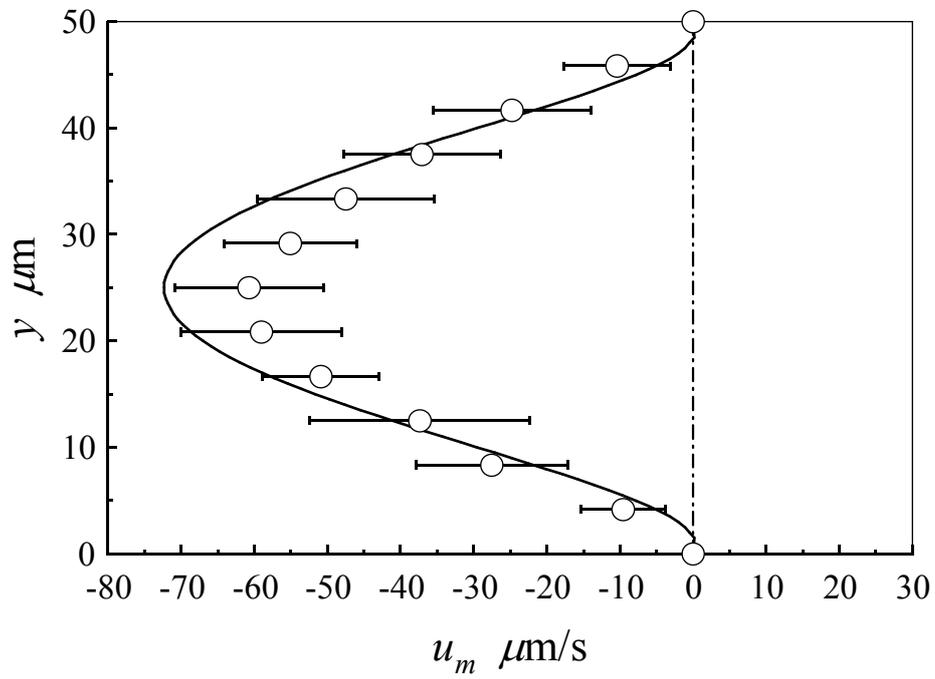


(a)

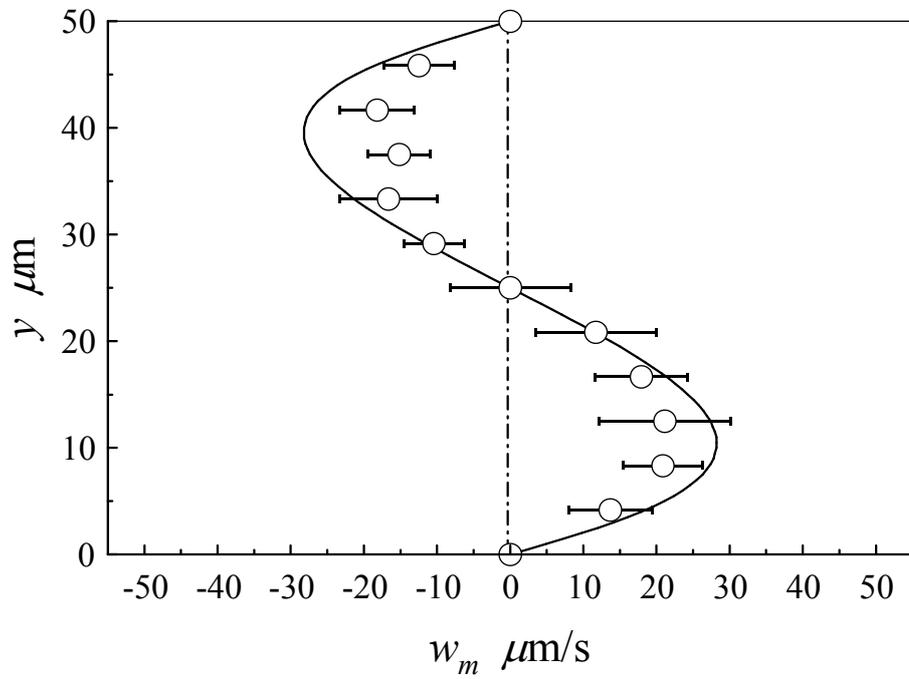


(b)

Fig. 2-27 Velocity profile ( $\phi_w = 135^\circ$ )



(a)



(b)

Fig. 2-28 Velocity profile ( $\phi_w = 180^\circ$ )

## 2・4・2 印加電圧の影響

図 2-29 は図 2-15 同様に電場印加後からの各深さ位置の微粒子の位置変化の一例である。実験条件は印加電圧  $V = 10 \text{ V}$ ，平板間隔  $H = 50 \mu\text{m}$ ，ツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$ ，相対チルト角  $\theta_w = 0^\circ (\theta(0) = 5^\circ)$  である。図より，微粒子は電場印加後，セル上部領域では負方向に移動し，下部領域では正方向に移動することがわかる。また，印加電圧  $V = 10 \text{ V}$  の微粒子は図 2-15 の印加電圧  $V = 5 \text{ V}$  の結果よりも早い時刻で大きく移動していることが確認できることから， $V = 5 \text{ V}$  よりも速い応答性を有している可能性が考えられる。一方で，微粒子の移動の様子を時間経過とともに見ていくと， $t = 165 \text{ ms}$  と早い時刻でほとんどの微粒子がすでに停止していることがわかり，平板間中に発生した速度は  $V = 5 \text{ V}$  の場合よりも早い時刻で 0 に収束したものと思われる。この結果に関しても，複数回実験を行い，微粒子の移動速度の平均値を取得することで数値計算結果との比較を行う。

図 2-30 に印加電圧  $V = 10 \text{ V}$ ，ツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$  における速度分布を示す。比較のため， $V = 5 \text{ V}$  の結果(図 2-24)を再掲している。図中の曲線は計算値である。なお，実験値のバラツキは図 2-24 と同程度であったので，エラーバーの表示を省略している。図 2-30 より， $V = 10 \text{ V}$  の速度分布は  $V = 5 \text{ V}$  と同様に S 字分布であるが，絶対値は  $V = 5 \text{ V}$  の結果よりも大きい。例えば実験結果に関して  $V = 10 \text{ V}$  の最大値は  $y = 37.5 \mu\text{m}$  の位置でおよそ  $u_m = -40 \mu\text{m/s}$  であり， $V = 5 \text{ V}$  の最大値の約 3 倍となっている。印加電圧の大きさは発生速度の大きさに顕著な影響を及ぼすが，その影響は運動方程式には陽に現れず， $y$  方向の角運動方程式に電場強度  $E (= V/H)$  の 2 乗の形で現れる<sup>(4)</sup>。したがって，印加電圧が 2 倍となった  $V = 10 \text{ V}$  では 4 倍の差が生じることになる。しかしながら，液晶分子の回転運動には他の項も影響している他，分子回転速度が誘起される流動の速度に直接的に反映されないため，印加電圧の倍増が単純に 4 倍にはなっていない。

実験結果と計算結果を比較すると，両者の間に図 2-24 と同様に 2 倍程度の差があることが，電圧の増加による背流の速度の増加率は実験，数値シミュレーションともに同程度であることがわかる。

上述の結果から，速度分布の形状およびアクチュエータサイズ(例えば平板間隔)を変更せず，単純に背流の速度の絶対値を増加させたい場合，印加電圧を増加させることで対応できることがわかる。

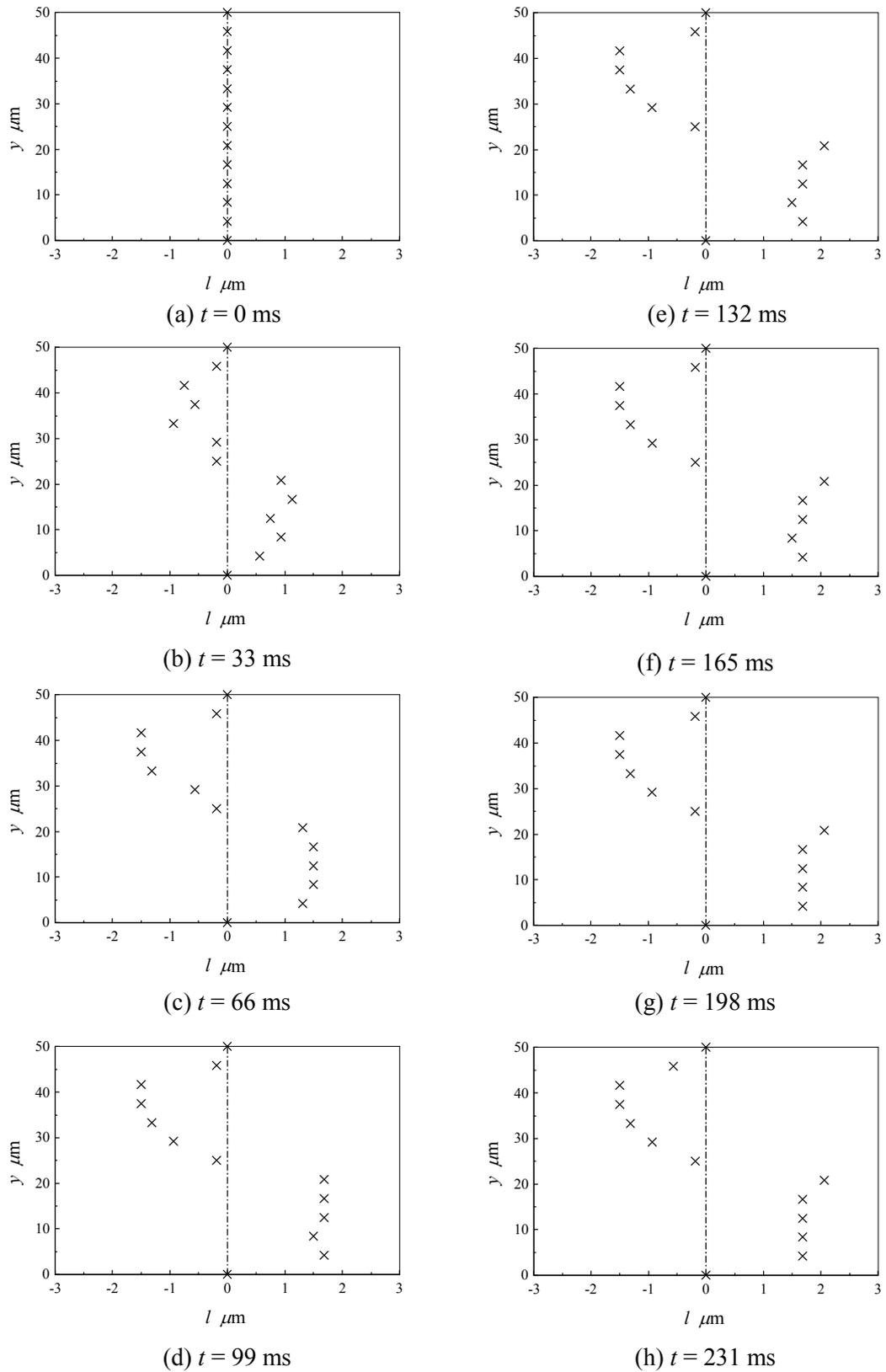


Fig. 2-29 Change in travel distance with time ( $V = 10$  V  $x$  direction)

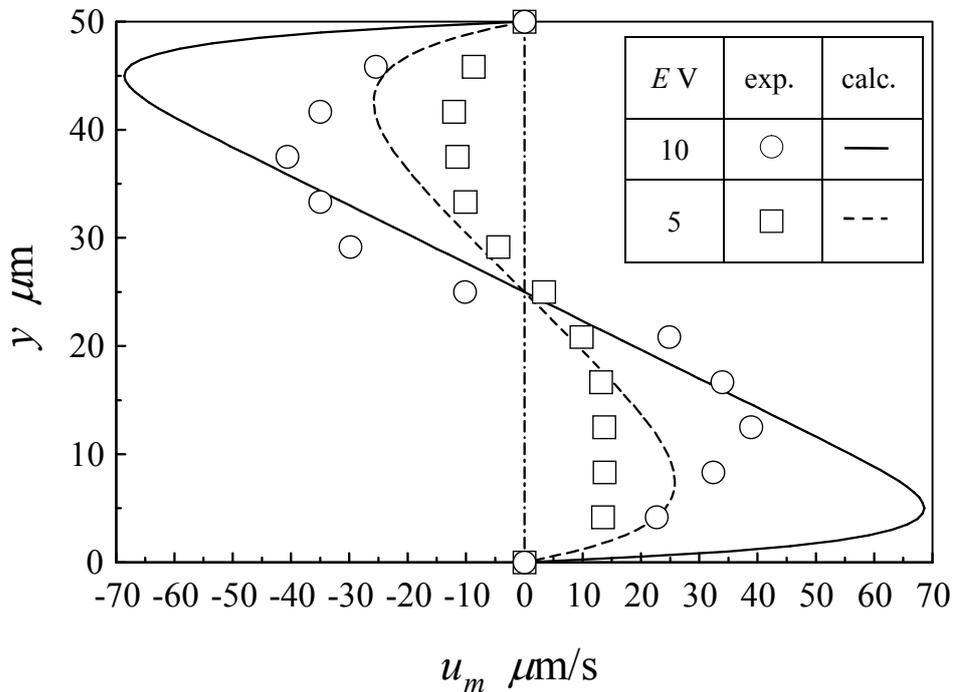


Fig. 2-30 Velocity profile ( $V = 10$  V)

### 2・4・3 平板間隔の影響

図 2-31 は図 2-15 同様に電場印加後からの各深さ位置の微粒子の位置変化の一例である。実験条件は印加電圧  $V = 5$  V, 平板間隔  $H = 25$   $\mu\text{m}$ , ツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$ , 相対チルト角  $\theta_w = 0^\circ$  ( $\alpha(0) = 5^\circ$ ) である。図より, 微粒子は電場印加後, セル上部領域では負方向に移動し, 下部領域では正方向に移動することがわかる。電場印加後からの微粒子の移動の様子は平板間隔  $H = 50$   $\mu\text{m}$  の結果と比較してほとんど同じであり, 平板間に生じた背流の速度の大きさは印加電圧  $V = 10$  V の結果と比較して大きくないものと考えられる。一方で微粒子の位置変化に注目すると平板間隔  $H = 50$   $\mu\text{m}$  の結果と比較して  $l = 3.5$   $\mu\text{m}$  に位置する微粒子もあり, 比較的大きな流量が発生していると予想できる。  $t = 231$  ms では図 2-15 の結果と同様の反対称な S 字分布形状となっているのがわかる。この結果に関しても, 複数回実験を行い, 微粒子の移動速度の平均値を取得することで数値計算結果との比較を行う。

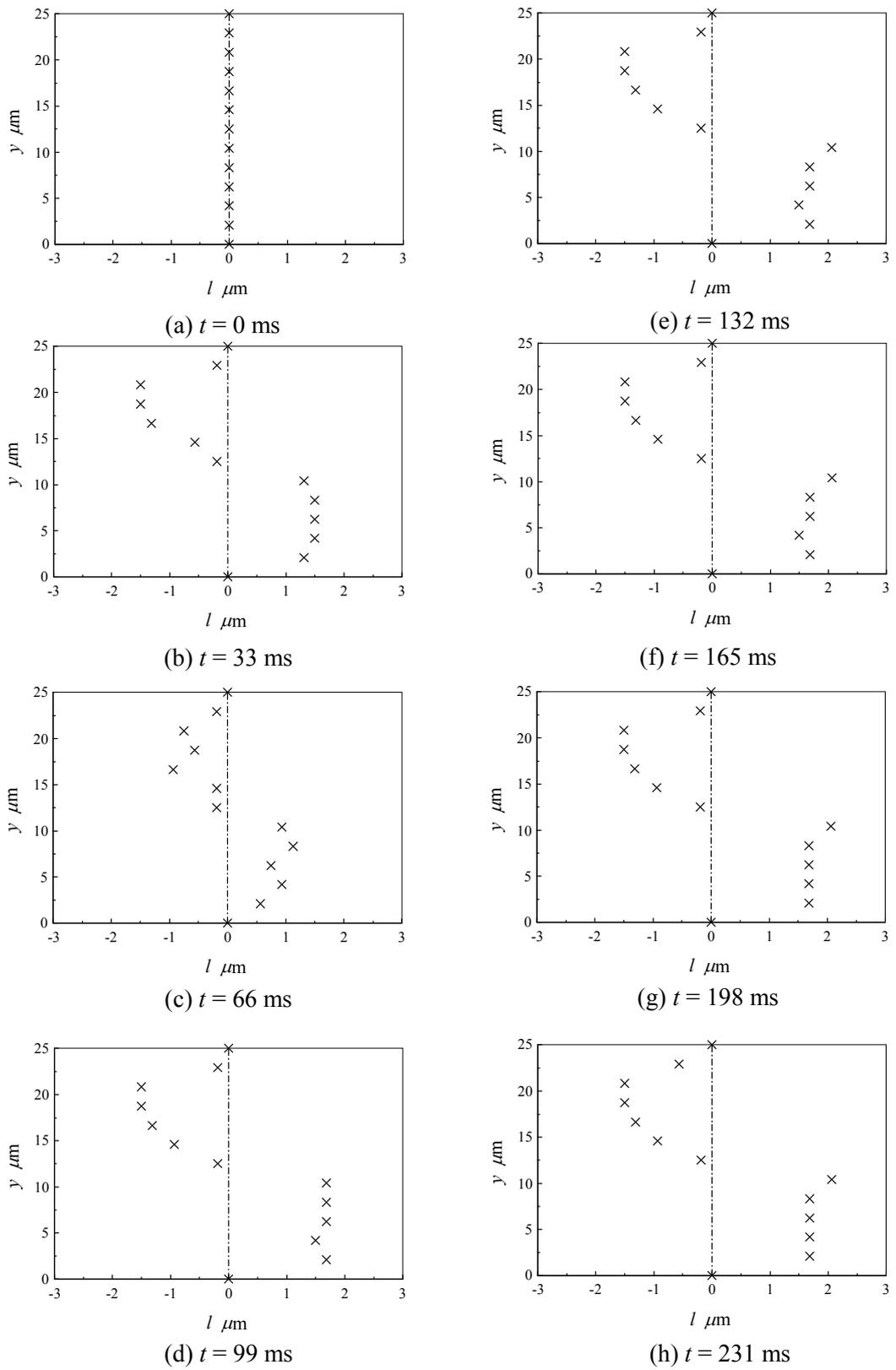


Fig. 2-31 Change in travel distance with time ( $H = 25 \mu\text{m}$  x direction)

図 2-32 に平板間隔  $H = 25 \mu\text{m}$  の速度分布測定結果を示す。比較のため、 $H = 50 \mu\text{m}$  の結果(図 2-24)を再掲している。平板間隔の異なる実験結果を比較するため、縦軸  $y$  を平板間隔  $H$  で無次元化している。電圧一定の元で平板間隔を減少させることは電場強度  $E$  を増加させることに等しい。したがって図 2-32 のように  $H = 25 \mu\text{m}$  の速度分布は  $H = 50 \mu\text{m}$  の実験結果と比較して 2 倍程大きい。この差は計算結果でも同じである。しかしながら、図 2-30、2-32 の結果から明らかなように平板間隔を減少させることで電場強度  $E$  を増加させた結果は印加電圧を増加させることで  $E$  を増加させた結果よりも小さな増加率となった。すなわち、それぞれの結果に関して、両者の電場強度が 2 倍程度大きくなっているにも関わらず、誘起される速度は図 2-30 の結果の方が図 2-32 の結果に比べて大きい。これについて以下のように考察される。

図 2-33 に電場強度一定( $E = 0.1 \text{ V}/\mu\text{m}$ )の条件で平板間隔  $H$  を変化させた際の、定常時におけるダイレクタの  $x$  成分  $n_x$  の  $y$  方向分布を示す。平板間中央部では配向分布は  $n_x = 0$ (すなわち、電場ベクトル方向に配向)であり、壁面近傍では配向分布は平板間隔に依存せず同じ分布を示している。平板間内に生じる背流は電場印加によるダイレクタの回転  $\dot{\mathbf{n}}$  によって生じ、式(2)より  $\nabla \cdot \mathbf{r}$  は  $\dot{\mathbf{n}}$  の空間こう配が生み出すことがわかる。したがって、ダイレクタの空間こう配が 0 である平板間中央部の分子は流動発生に寄与しない。同様に、壁面近傍の配向状態が平板間隔  $H$  に依存しないことから、誘起される応力、速度も  $H$  に依存せず同じであるといえる。結果として、平板間隔の減少により平板間中央部の速度こう配が必然的に大きくなり、それに伴うせん断応力が増加する。しかしながら、これを緩和するために壁面近傍の速度が減少したため、図 2-30 と図 2-32 の結果の差異について図 2-30 の結果が相対的に大きくなったと思われる。

上記の結果から、同じ電場強度であっても印加電圧の大きい場合の方が発生する背流の速度が大きい。しかしながら、同じ印加電圧の場合、平板間隔を減少させることで発生する背流の速度を増加させることができ、マイクロサイズのアクチュエータを開発する際には平板間が必然的に減少することから、効果的に作用するものと考えられる。

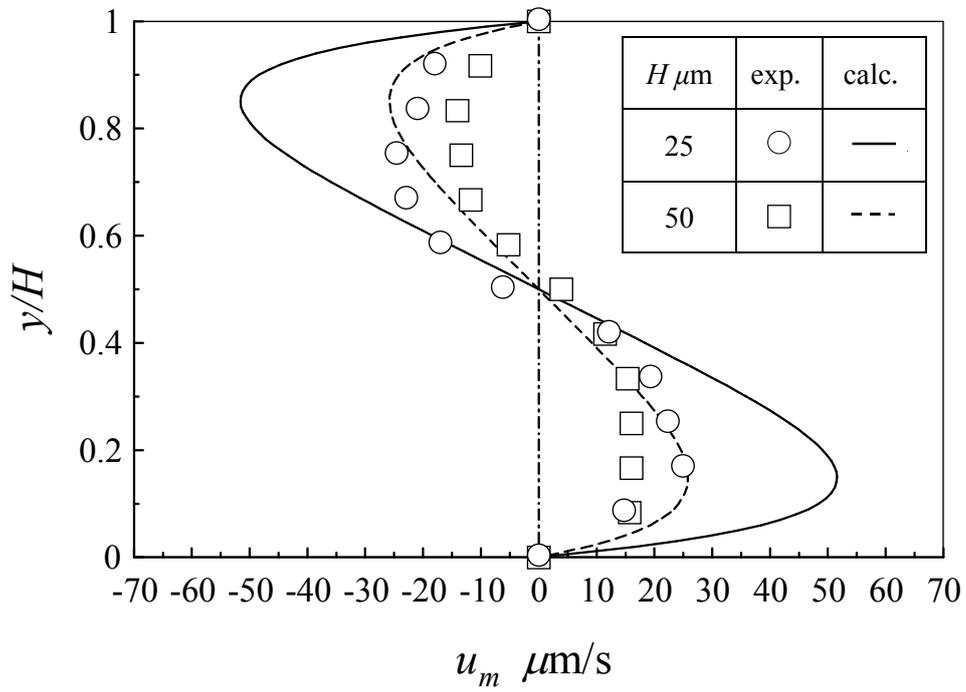


Fig. 2-32 Velocity profile ( $H = 25 \mu\text{m}$ )

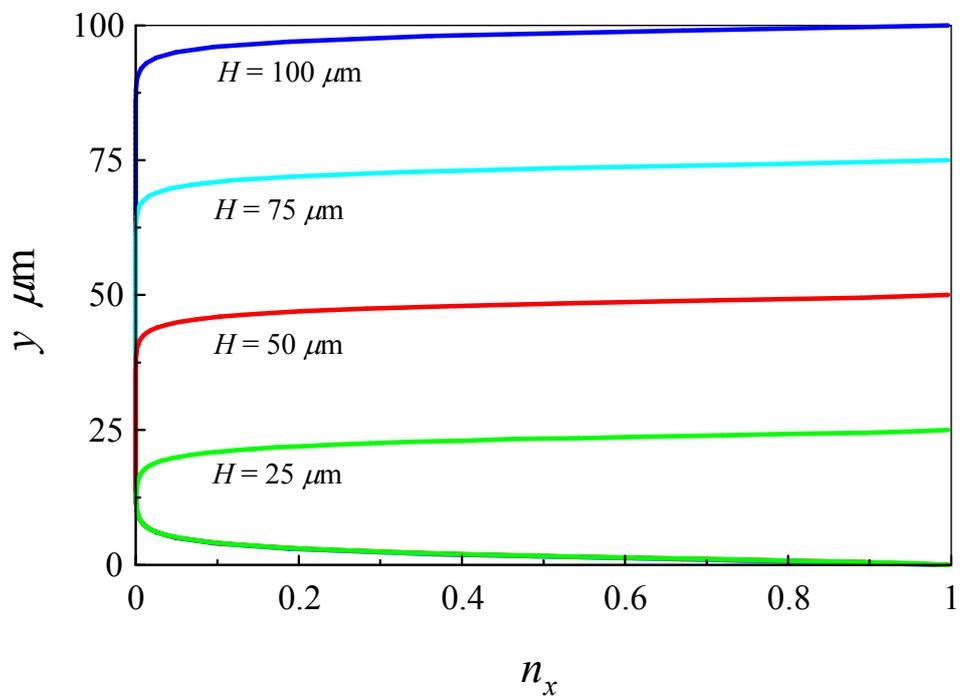


Fig. 2-33 Orientation profiles of the director at steady state with constant electric field strength

## 2・4・4 ハイブリッド配向の影響

図2-34にハイブリッド配向セル(相対チルト角  $\theta_w = 85^\circ$  ( $\theta(0) = 5^\circ$ ))における速度分布を示す. 実験条件は印加電圧  $V = 5\text{ V}$ , 平板間隔  $H = 25\ \mu\text{m}$ , ツイスト角  $\phi_w = 0^\circ$  である. 比較のため, 図2-24に示した, 水平配向セルの速度分布を再掲している. 実験結果に関して, ハイブリッド配向セルの速度分布は水平配向セルの速度分布と比較して, 分布形状に違いが見られる. 特に速度の切り替わる点がセル中央部から上方向にシフトし, 発生する速度の最大値も増加していることがわかる. 一方で, ハイブリッド配向の実験結果と数値計算結果とを比較すると, 速度分布が明らかに異なる.

図2-35に数値計算より得られたハイブリッド配向セルの速度分布の時間変化を示す. 図より, 壁面近傍を除く流路全体で電場印加直後に負の方向に発生した背流が時間経過とともに正の方向へと変化する. また, 速度分布は電場印加直後より, 急激に発達する. すなわち, 水平配向では図2-14のように  $t = 200\text{ ms}$  で最大流速が生じているのに対して, ハイブリッド配向では  $t = 1\text{ ms}$  で最大流速を得る. この理由について以下のように考える.

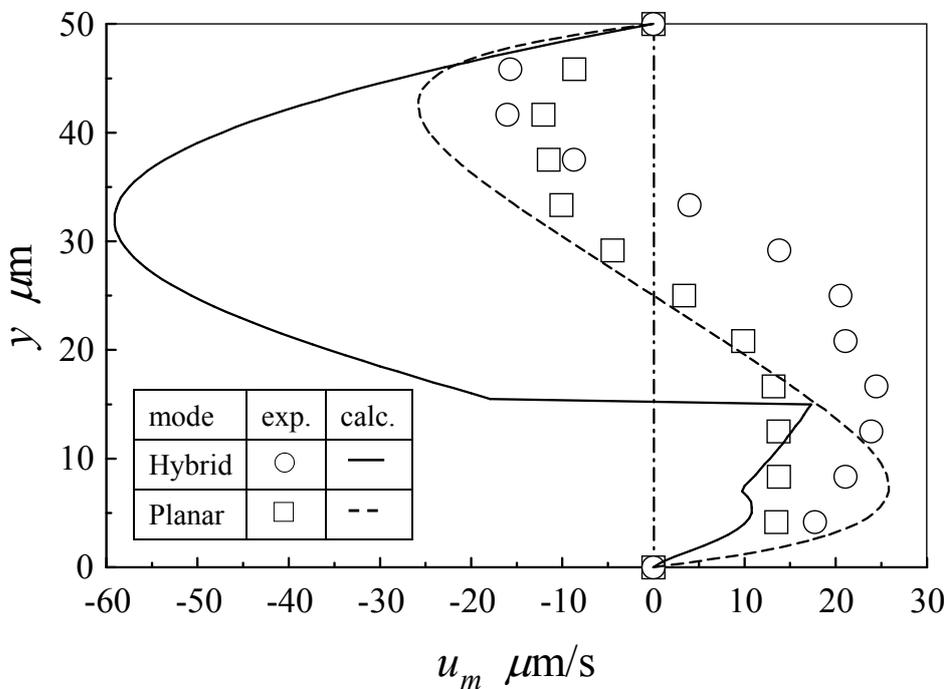


Fig. 2-34 Velocity profile (Hybrid aligned cell)

まず、ハイブリッド配向の配向状態の変化について考える。2・4・3節で述べたように、流動の発生には配向こう配の時間変化が影響する。図 2-36 はハイブリッド配向における電場印加後のディレクタ  $\mathbf{n}$  の配向角  $\theta$  の深さ方向分布を示したものである。図 2-35 と図 2-36 を検討すると、 $u_m = 10 \mu\text{m/s}$  程度の流速が発生している  $t = 1\text{ms}$  の配向状態は初期の配向状態とほとんど変化していない。そこで、ディレクタ  $\mathbf{n}$  の角速度に注目する。図 2-37 はハイブリッド配向のディレクタ  $\mathbf{n}$  の角速度の深さ方向分布の時間変化を示したものである。参考に図 2-38 に水平配向のディレクタ  $\mathbf{n}$  の角速度の深さ方向分布を示す。図 2-37, 2-38 より、それぞれのディレクタの角速度の最大値は同程度の大きさを有していることがわかる。すなわち、流動に起因するのは配向の角度変化ではなく、角度の発達速度(すなわちディレクタの角速度)に強く依存することがわかる。図 2-38 において、各速度の大きさはセル全域で増加し始め、時間の経過とともにセル中央部が増加する。その後液晶分子が電場方向に配向しきるため徐々に減少する。一方、図 2-37 のハイブリッド配向の場合では  $t = 1 \mu\text{s}$  からセル下部領域の正方向、負方向それぞれに角速度を持ち、時間の経過とともに正方向の角速度はセル下部領域からセル上部領域へと移動していく。このため、ハイブリッド配向は電場印加直後から比較的大きな流動を速度の切り替わり点を  $y$  方向にずらしながら発生し続けたものと考えられる。また、

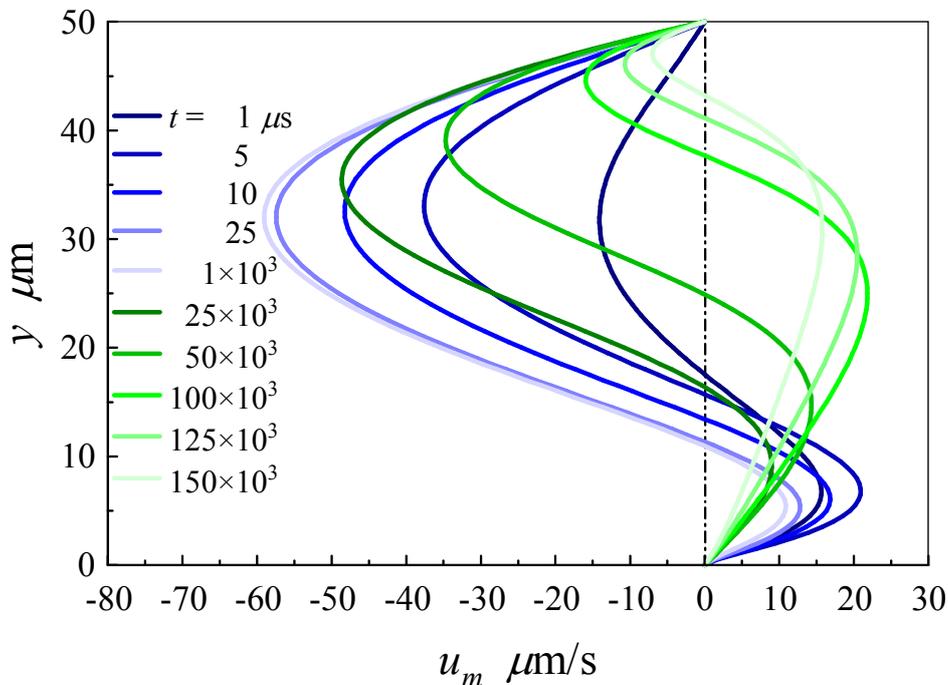


Fig. 2-35 Change in velocity profile with time

ハイブリッド配向の角速度が  $t = 1 \mu\text{s}$  と早い時刻で非常に大きな値を示したのは、ハイブリッド配向の初期の配向状態によるものと考えられる。

図 2-14, 2-38 に示す水平配向の場合、電場印加直後にバルク領域中のどのディレクタも等しい角速度で回転する。したがって、図 2-39(a)に示すように隣接するディレクタは互いに等しい速度勾配を有する。そのため、速度勾配を深さ方向に積分すると速度勾配は相殺され、結果的に流動は 0 となりバルク領域のディレクタの回転は流動に寄与しない。一方、ハイブリッド配向のように深さ方向にディレクタが連続的に角度を変化させながら配向している場合、配向角に応じて角速度が異なる。そのため、図 2-39(b)に示すように互いに速度勾配は相殺されず、速度勾配の積分値は 0 にならない。したがって、電場印加直後から流路全域のディレクタの回転は流動に寄与し、早い応答速度を示したものとする。

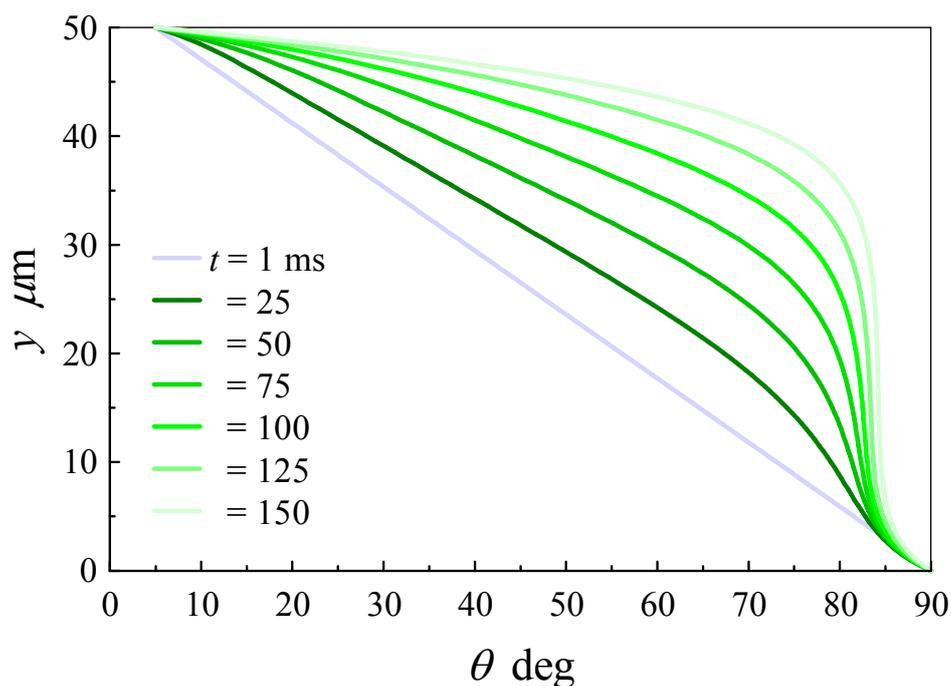


Fig. 2-36 Change in director profile with time

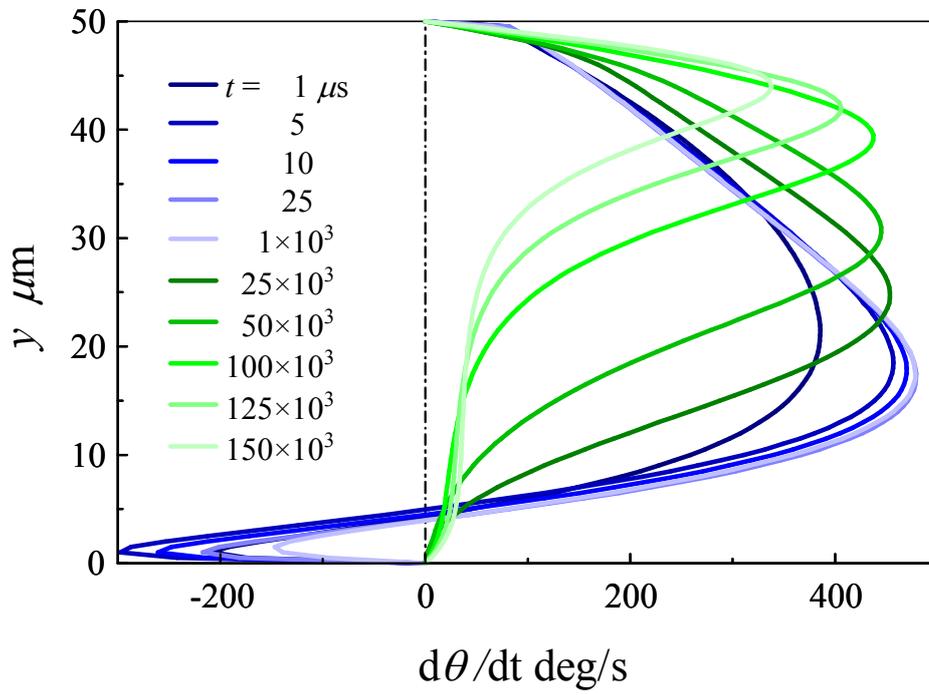


Fig. 2-37 Change in angular velocity profile with time (hybrid)

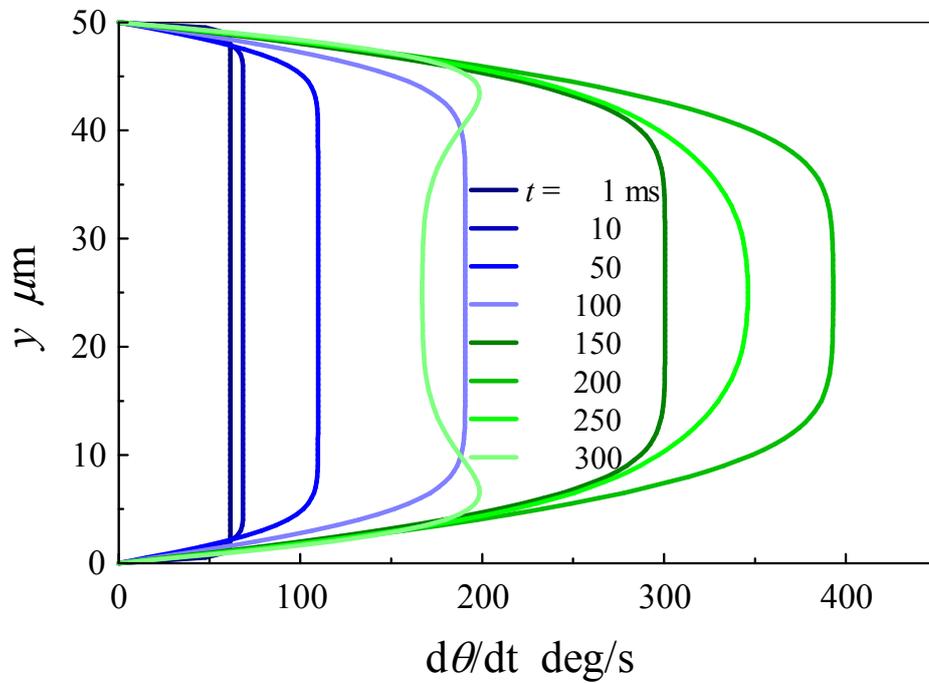


Fig. 2-38 Change in angular velocity profile with time (planar)

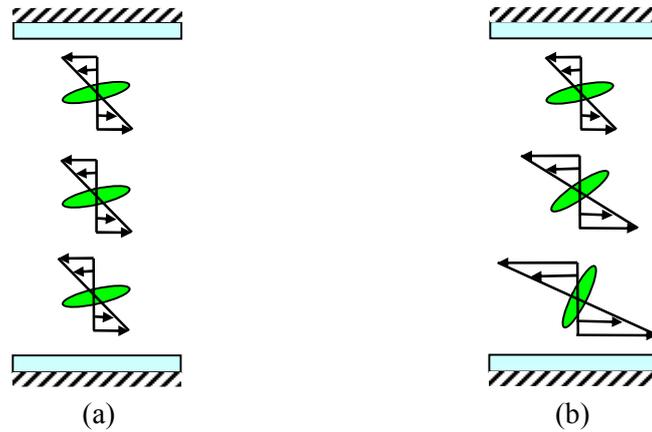


Fig. 2-39 Balance out of the velocity gradient

一方、実験結果は2・2・1・2節で述べたように、微粒子移動の様子を30 frame/sすなわち33 ms 間隔で取得している。そのため、33 ms にわたって平均化された微粒子の速度しか捉えられない。その結果、図2-34の分布の違いが生じたと考える。

そこで、ハイスピードカメラ(FASTCAM-512PCI:株フォトロン)を用いて追加実験を行った。図2-40はハイスピードカメラを用いて微粒子の位置を追尾した結果である。横軸は電場印加後からの経過時間、縦軸は各時刻における微粒子の位置を示し、平板間を12等分した各深さ位置での変化を示している。比較のため、同条件での数値計

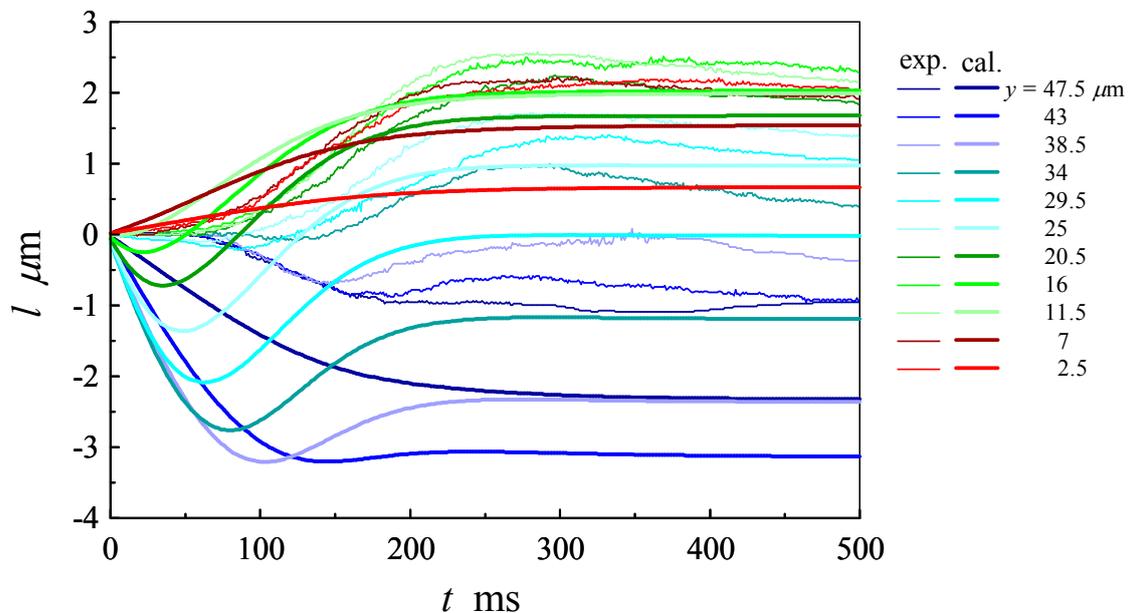


Fig. 2-40 Change of the particle position with time

算結果を併記している。撮影条件は 1000fps とし、時間分解能は 1 ms である。また、ハイスピードカメラの撮像素子の面積、設置位置の関係から対物レンズを 40 倍から 100 倍に変更し、空間分解能  $0.195 \mu\text{m}$  を確保した。微粒子の移動の様子に注目すると、 $y = 38.5 \mu\text{m}$  よりも上の領域では微粒子は負方向に移動し、それよりも下の領域では正方向に移動していることがわかる。一方、数値計算は  $y = 34 \mu\text{m}$  よりも上の領域で負方向の流動が確認され、それよりも下の領域で正方向の流動が確認できる。両者を比較すると、流動発生方向に関して定性的な一致が見られる。しかしながら、このグラフの傾きから得られる速度を考慮すると、実験値と計算値に一致は見られない。

図 2-41 は電場印加後、微粒子が停止した位置の深さ方向分布を示したものである。図のプロットは微粒子が停止した位置の平均値を表し、図の曲線は微粒子が停止するまでの 250 ms 間で速度を積分したものである。図より、微粒子の停止位置の方向(正負)に関しては実験と計算値で定性的によく一致している。しかしながら、運動開始から停止位置までの距離に関しては定量的な一致は見られない。そこで、図 2-41 に示すようにセル下部壁面で液晶分子の配向状態を変化させたときの背流の速度の積分値の変化に注目する。図のように壁面部の分子配向状態が変化することで分布形状が著しく変化する。この図より、実験結果は  $\theta(H) = 90^\circ$ ,  $\theta(0) = 15^\circ$  の結果と比較的よく一致しており、ハイブリッド配向として定義していた  $\theta(H) = 90^\circ$ ,  $\theta(0) = 5^\circ$  の結果との比較では大

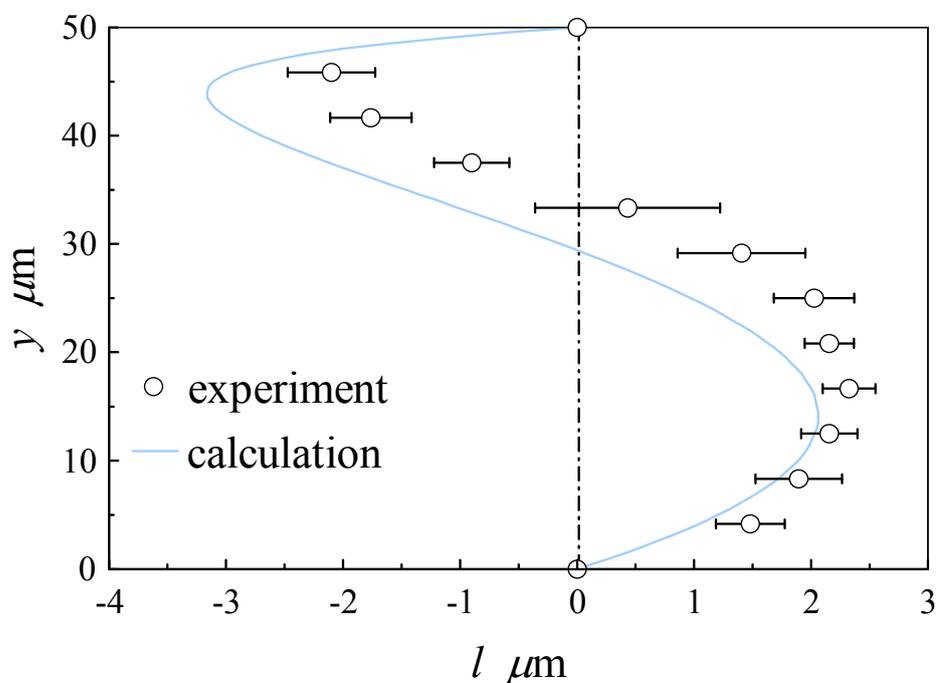


Fig. 2-41 Change of position profile

きな差が生じていることがわかる。また、図 2-40 と同様にチルト角が  $\theta(H) = 90^\circ$ ,  $\theta(0) = 15^\circ$  のときの、微粒子の位置を実験結果と数値計算結果とを比較した結果を図 2-43 に示す。この図より、壁面部である  $y=2.5, 7, 47.5, 43 \mu\text{m}$  を除いて、微粒子の位置の変化は定性的によく一致していることがわかる。これらの結果から、実験におけるハイブ

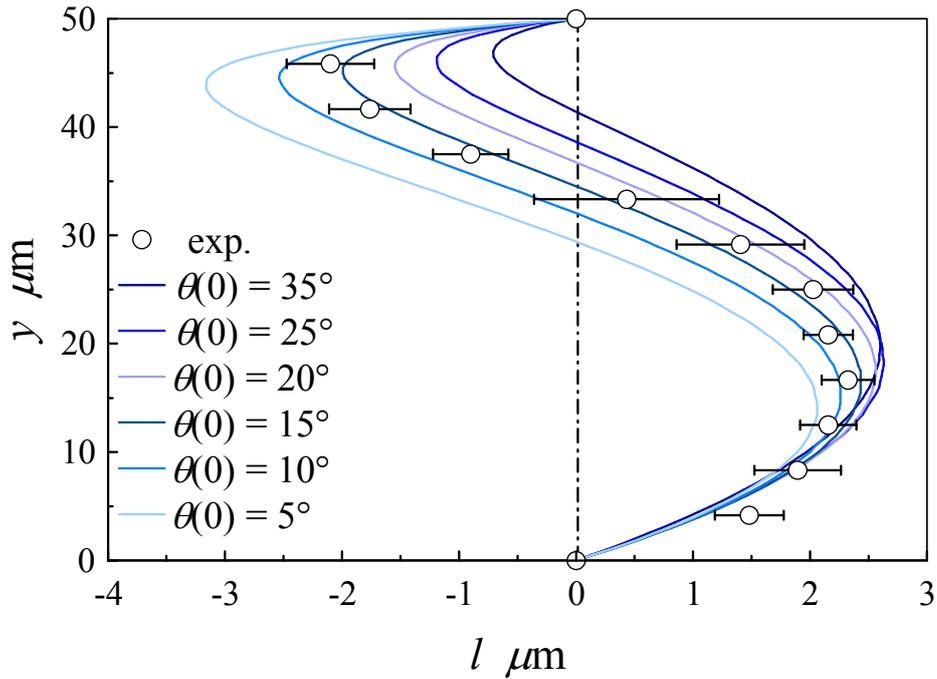


Fig. 2-42 Change of position profile with tilt angle

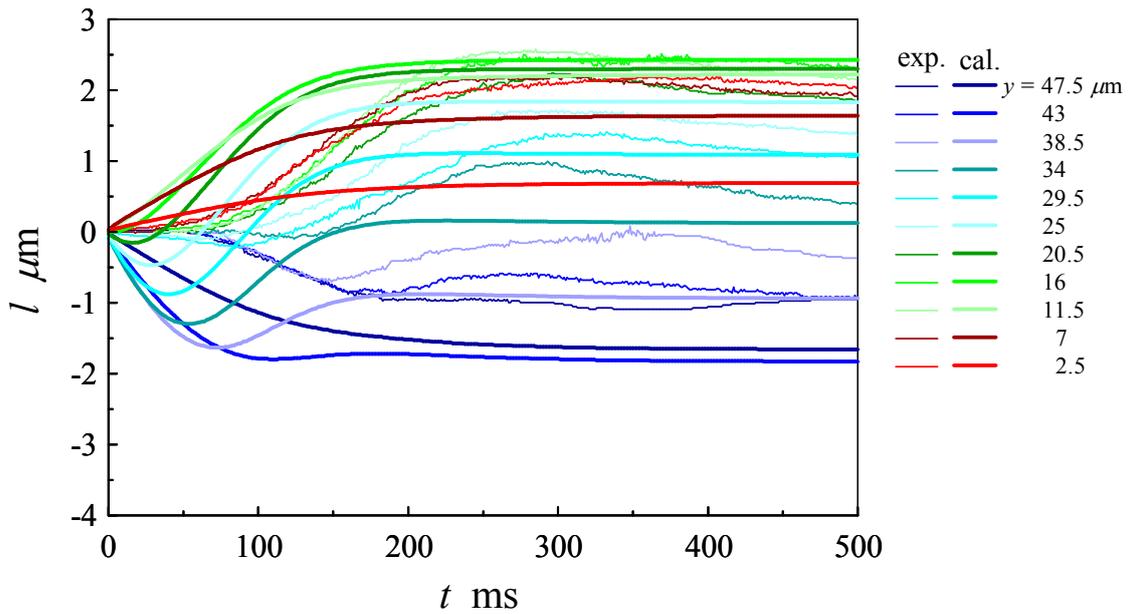


Fig. 2-43 Change of the particle position with time ( $\theta(H) = 90^\circ$ ,  $\theta(0) = 15^\circ$ )

リッド配向はセル上下壁面でチルト角が  $\theta(H) = 90^\circ$ ,  $\theta(0) = 15^\circ$ であると推定される。このため、ハイブリッド配向状態での水平配向膜に隣接する液晶分子は予定していた  $\theta(0) = 5^\circ$ ではなく、僅かに電場方向に起き上がっていたと考えられる。より正確にハイブリッド配向の背流の様子を明らかにするためには水平配向膜上の液晶分子の配向角を測定し、再度、数値計算と照らし合わせる必要がある。

水平配向剤と垂直配向剤を組み合わせることで実現したハイブリッド配向での速度分布測定および微粒子の位置測定を行った。実験では初期配向状態が予定していた状況と異なったため、数値計算結果と一致しなかった。しかしながら、定性的にはハイブリッド配向における微粒子の位置の分布形状は一致しており、数値計算による予測が可能であることが明らかにされた。ハイブリッド配向はその配向処理において、水平配向よりも優位な点を有する。水平配向の場合、液晶分子を基板表面に配向させるため、配向膜の成膜と配向膜のラビング処理が必要となる。1章で述べたようにラビング処理は配向膜を成膜された基板表面を布で擦る工程を必要とする。そのため、開発目標となる液晶アクチュエータのサイズ、構造によっては構成部品へのラビング処理が困難な場合がありえる。例えば、直径  $100\ \mu\text{m}$  程度のサイズを有する図 2-44 のような液晶モータを考えた場合、内筒表面へのラビング処理は可能であるが、図中の赤線で示すような外筒内表面へのラビング処理は非常に困難なものといえる。これに対して、ハイブリッド配向は配向膜の塗布のみで配向能を得られる垂直配向剤を用いていることから、一方の配向処理を簡略化でき、マイクロアクチュエータの開発に寄与するものと考えられる。

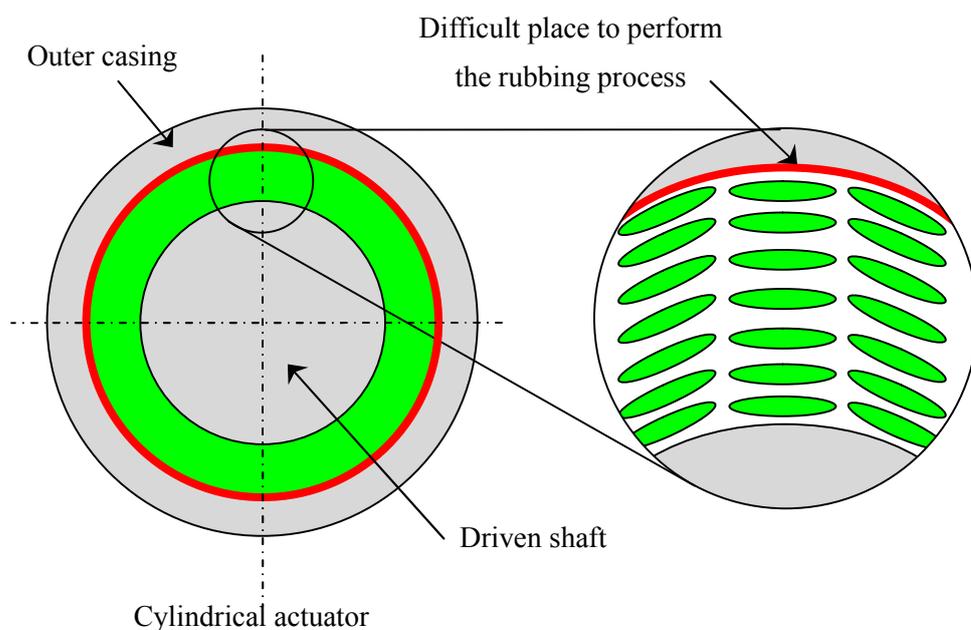


Fig. 2-44 An example of a cylindrical actuator

## 2・4・5 結 言

本章では電場印加時における平行平板間背流の可視化実験を行い、電場印加時の液晶分子の配向状態(ツイスト角, ハイブリッド配向), 印加電圧, 平板間隔が発生する背流に与える影響を明らかにした。また, L-E 理論を用いた数値シミュレーションを行い, 実験結果と比較検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 微粒子を用いた可視化法によって, 背流の速度分布を明らかにした。
- (2) ツイスト角の増加により, 速度分布形状は著しく変化し, その絶対値も増大することが明らかとなった。
- (3) 実験結果と計算結果は定性的な一致を示したが, 定量的な一致を示さなかった。また, 実験結果は常に計算結果を下回り, 計算では考慮されていない表面張力の影響が表れた。
- (4) 電場強度一定の場合, 壁面近傍の配向分布は平板間隔に無関係に同じ形状を示す。そのため, 平板間に生じる背流の大きさは平板間隔によらず一定である。しかしながら, 平板間隔の減少に伴う粘性応力の増加は誘起される流動の大きさを抑制するように作用することから, 印加電圧の大きさの違いにより誘起される流動の大きさに差が生じる。
- (5) ハイブリッド配向は水平配向と比較して, より速い速度を発生させた。これは, 流動発生に寄与する配向こう配が平板間全域で有限の値を持ち, すべての分子が流動発生に寄与したためである。
- (6) 実験におけるハイブリッド配向状態は予定していた配向状態と異なっており, より正確な測定を行うためには水平配向膜に隣接する液晶分子の配向角を測定する必要がある。
- (7) 液晶分子の配向状態, 印加電圧, 平板間隔を変化させることで誘起される速度分布の形状, 大きさを制御することが可能であり, 各種パラメータを適切に選択する

ことで、任意の特性を有するアクチュエータの開発が可能である。

- (8) L-E 理論を用いた背流の予測は妥当であり、実験では測定しがたい分子挙動や、せん断能力などの分析に有効であり、アクチュエータ開発において最適条件を導く有効な手段であるといえる。

## 3 章 背流を用いた平板駆動実験

### 3・1 緒言

近年、MEMS 技術の発達により、比較的容易にマイクロ・ナノサイズの機構部品の作成が可能となった。特に LIGA プロセス(超微細な高アスペクト比を有する部材を生産するため開発された技術であり、主に半導体分野で使われている)<sup>(28)</sup>を用いることで高アスペクト比のマイクロ部材の創出することができる他、生産技術の向上により量産技術も確立されつつある。機構部品のマイクロ化により、従来作成不可能だったマイクロサイズのアプリケーション開発が可能となる。また、“慣性による損失がない”、“低排塵性”、“センサ・プロセッサのような集積化が可能”など部材のマイクロ化に伴う利点が生じる。このようにマイクロサイジング化によって、これまでの機械構造品にはない利点が得られることから、多くの研究者が積極的にマイクロマシンの開発に着手するようになった。しかしながら、マイクロサイズのマシンを動作させるアクチュエータの開発は上述のセンサ・プロセッサと比較して、その技術進歩が遅れている。

マイクロアクチュエータの候補として、“静電アクチュエータ”、“PZT アクチュエータ<sup>(29)</sup>”、“圧電アクチュエータ<sup>(30)</sup>”などが挙げられる。これらはいずれも小型の割に高出力であるが、マイクロサイズへの小型化は困難である。そのほか、固体材料が接触する摺動部における加工精度からくる摩擦、マイクロ化に伴う表面力の増大などの問題が挙げられる。上記の小型化に対する欠点を克服するアクチュエータとして、“機能性流体”を用いた流体アクチュエータが提案された。機能性流体は流体周囲の外場(特に電場、磁場)により、その物性を変化させる流体の総称である。機能性流体を用いたアクチュエータとして、“ECF マイクロアクチュエータ<sup>(30)</sup>”が挙げられる。これらは先のアクチュエータと比較して、“シンプルなアクチュエータ機構”、“固体摩擦の低減”などが実現できる。しかし、高電圧電源装置が必須となることから、全システムの大規模化が懸念される。

マイクロアクチュエータに必要な要件は、“単純(シンプル)な構造であること”、“生産工程が容易であること”、“固体潤滑部を極力有さないこと”、“比較的扱いやすい電圧で駆動すること”、“小型化が容易であること”である。このような要件に応えるアクチュエータとして、液晶駆動型アクチュエータが挙げられる。この液晶駆動型アクチュエ

ータは電場によって液晶分子の配向状態を変化させ、その際に発生する流動(背流)によるせん断応力によって物体を動かすという、従来にはないアクチュエータである。

本章では背流を用いて、物体の移動実験を行う。背流が実際にアクチュエータの駆動源として機能するかどうかを吟味することは非常に有意義であり、実際に駆動実験を行うことは、今後のアクチュエータ開発に向けた基礎データを得る上で重要である。

実際の手法としては2章で取り扱った液晶セルにおいて、図3-1のようにガラスの接着部を排除し、フィルムスペーサの代わりに球形状のスペーサを用いることで、一方のガラスを自由に運動できるようにする。発生した背流のせん断力で上部平板を駆動させるというものである。図3-2は上部平板の運動、液晶分子の配向状態、電圧波形のモデルである。図のように平板間に電圧を印加することで液晶分子の長軸は電場方向に平行になるように回転し、その際に生じる背流によって上部平板は駆動する。電圧が印加され続けている状態では液晶分子はそれ以上回転せず、背流が消滅することから、上部平板を駆動させ続けることはできない。そこで、図3-3に示すように、電場印加および解放を繰り返すことで、液晶分子を初期の配向状態に戻し、再び流動を発生させる手法をとる。このプロセスを繰り返すことで背流を断続的に発生させ、上部平板を駆動させる。

上述のように、上部平板駆動には電圧印加、解放を連続的に繰り返すことから、印加周波数が上部平板駆動速度に影響を与えることが予想される。また、印加電圧の大きさによって発生する流動が変化することから印加電圧も影響を与えることが明らかである。さらに2章で相対チルト角  $\theta_w = 85^\circ (\theta(0) = 5^\circ)$  であるハイブリッド配向で発生した流動が水平配向と異なる分布形状を示したことから、上部平板駆動速度に与える初期配向状態の影響について明らかにする必要がある。本章では、印加電圧周波数、印加電圧、配向状態が上部平板駆動に与える影響について明らかにすることを目的とする。

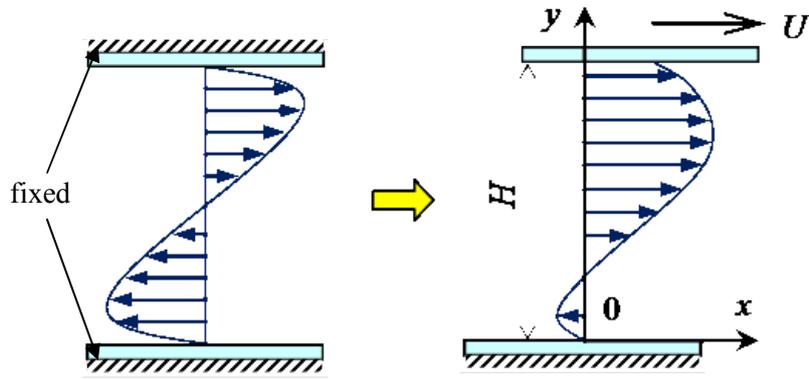


Fig. 3-1 Driving method of the liquid crystalline actuator

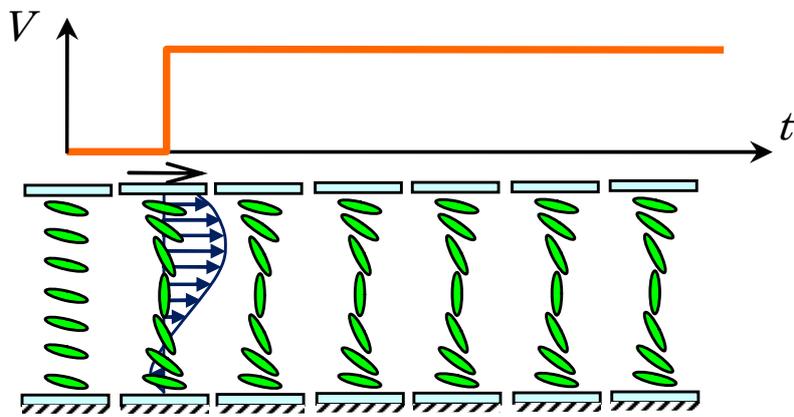


Fig. 3-2 Generating back-flow and applying voltage

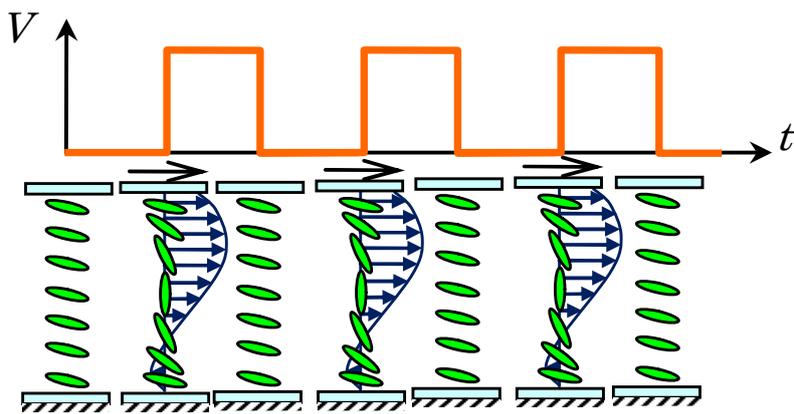


Fig. 3-3 Generating back-flow and applying voltage

## 3・2 実験装置および方法

図 3-4 に本実験で使用する駆動装置を示す。駆動装置は上下で大きさの異なる 2 枚のガラス平板と液晶から成り、液晶にはスペーサが混入されている。各ガラス平板は以下のように作成される。

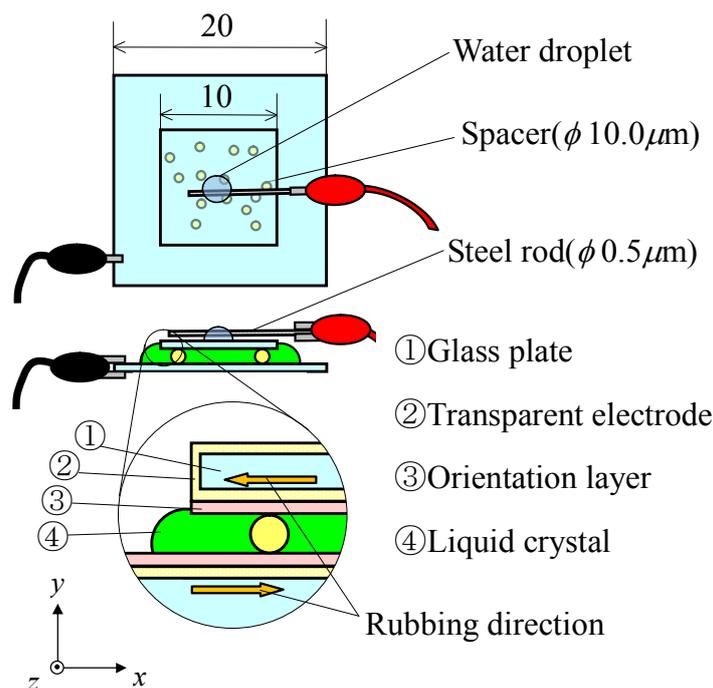


Fig. 3-4 Actuator assembly

### 3・2・1 上部ガラス平板の作成

上部ガラス平板は  $20 \times 20 \text{ mm}$  のカバーガラス(松浪硝子工業株)を 4 等分し  $10 \times 10 \text{ mm}$  にしたものを使用した。上部ガラス平板の重さは約  $0.35 \text{ g}$  である。液晶に電場を印加するため、図 3-5 の高周波スパッタリング装置を用いて透明電極膜を成膜する。スパッタ条件は表 3-1 のように設定し、ガラス表面の表と裏で計 2 回成膜処理を行った。透明電極膜には透過率が高く、高い導電性を有する酸化スズ膜(ITO 膜)を採用した。成膜後の抵抗率はおおよそ  $100 \Omega/\square$  である。次に、液晶分子の配向方向を決定するため、ガラス表面上に配向処理を施す。配向材料はハイブリッド配向の上部平板駆動特性に与える影響



Fig. 3-5 Sputtering machine RFS-200

Table 3-1 Sputtering condition

使用装置	スパッタリング装置	RFS-200 (アルバック機工株)
	スパッタリングターゲット	ITO (アルバックマテリアル株)
	冷却装置	CA-1112 (東京理科機械株)
スパッタリング 条件	環境温度	25°C
	冷却温度設定	15°C
	ステージ温度	200°C
	放電ガス導入前真空槽圧力	$6.5 \times 10^{-3}$ Pa
	放電ガス	Ar
	放電ガス導入圧力	2.0 Pa
	スパッタ時間	5 min
	ターゲット距離	30 mm

Table 3-2 Condition of the spin-coating method

使用装置	1H-DX2(ミカサ)	
成膜条件	滴下量	180 $\mu$ l
	回転数	5500 rpm
	立ち上がり	10 sec
	定常回転	20 sec
	立下り	5 sec

Table 3-3 Condition of the rubbing process

使用装置	RM-50(株EHC)	
ラビング条件	押し込み量	300 $\mu$ m
	回転数	400 rpm
	ステージ速度	200 mm/min
	ラビング回数	2

を調べるため、2章で用いた水平配向材料(オプトマーAL3046:JSR(株))と垂直配向剤(JALS-2021-R25:JSR(株))の2種類を使用した。成膜条件はガラスサイズが異なるため、表3-2のようにする。成膜後、オーブンでの焼成、ラビング処理を表3-3のように行った。

### 3・2・2 下部ガラス平板の作成

下部ガラス平板は20×20 mmの透明電極膜付きガラス板(EHC社製)を使用した。配向材料として、水平配向材料(オプトマーAL3046:JSR(株))を使用し、表3-4に示すようなスピコート条件で処理した。スピコート後、ガラス平板は180℃で10分間焼成され、その後、ガラス平板を表3-5に示す条件でラビング処理を施す。

Table 3-4 Condition of the spin-coating method

使用装置	ミカサ(株) 1H-DX2	
成膜条件	滴下量	360 $\mu$ l
	回転数	4500 rpm
	立ち上がり	10 sec
	定常回転	20 sec
	立下り	5 sec

Table 3-5 Condition of the rubbing process

使用装置	(株)EHC RM-50	
ラビング条件	押し込み量	300 $\mu$ m
	回転数	400 rpm
	ステージ速度	200 mm/min
	ラビング回数	2

### 3・2・3 実験方法

#### 3・2・3・1 スペーサ微粒子入り液晶の作成

図 3-4 に示すように、上下平板の間には平板間隔を一定に保つためスペーサ入りの液晶が用いた。使用したスペーサは直径 10  $\mu$ m のシリカ微粒子(マイクロパール:積水化学工業(株))である。液晶との混合方法は 2 段階希釈法を用いた。まず、液晶 2000  $\mu$ l にマイクロパールを 0.01 g 混合し、攪拌する。次に攪拌後の微粒子入り液晶から 10  $\mu$ l を取り出し、別の液晶 300  $\mu$ l に混合する。これにより、体積分率はおよそ 0.2%となる。

#### 3・2・3・2 駆動装置の組み立て

図 3-4 に示す駆動装置を以下のようにして組み立てる。作成した下部ガラス平板を配向処理面が表向きになるようにスライドガラス(S1126:松浪硝子工業(株))に固定する。あらかじめ等方相まで温度を上げたスペーサ入り液晶材料を処理面上に 6  $\mu$ l 滴下し、さら

にその上に上部平板の処理面を下部処理面に対して対向するように重ね合わせる。このとき、図 3-4 に示すようにラビング方向が上下で対向させるように配置する。その後、流動配向およびメモリ効果を除去するため、作成した駆動装置をホットプレートの上で等方相温度まで加熱し、その後、常温で自然冷却する。加熱冷却を行った駆動装置を偏光顕微鏡(LV100POL:(株)ニコン)の簡易 x-y ステージに設置する。電圧印加装置からの電極を図 3-4、3-6 のように下部ガラス平板はクリップで固定し、上部ガラス平板はステンレス棒を上部ガラス平板に橋渡しするように設置し、ステンレス棒と上部ガラス平板は水滴を介して通電する。このとき、駆動装置の液晶分子光学軸と偏光顕微鏡の偏光子(Polarizer)と検光子(Analyzer)の光学軸は図 3-6 のように構成する。偏光子と検光子はクロスニコル状態とし、液晶分子の光学軸は偏光子から  $45^\circ$  傾いた状態とした。

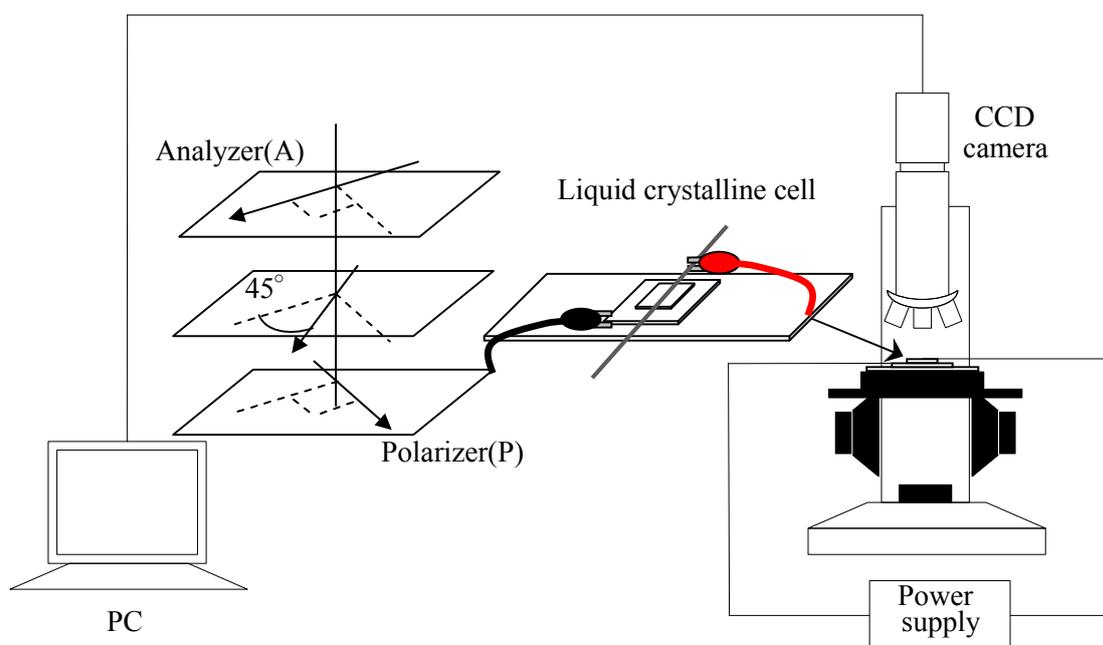


Fig. 3-6 Experimental setup

上述したように下部平板に対して自由に運動できる上部ガラス平板を電場印加によって生じる流動のせん断力を用いて動かす。すでに本研究室で行った基礎実験で上部平板の駆動は確認されたがより詳細な駆動特性に関しては明らかにされていない。そこで、本稿では電圧印加周波数、印加電圧および配向状態に注目して、実験を行う。

周波数の影響を調べる実験では、電圧  $V = 10 \text{ V}$ 、周波数  $f = 1\text{-}1000 \text{ Hz}$ 、デューティ  $D = 5\%$  のパルス波で実験を行った。一方、電圧強度の影響を調べるため、電圧  $V = 0\text{-}10 \text{ V}$ 、周波数  $f = 1, 10, 100 \text{ Hz}$ 、デューティ  $D = 5\%$  のパルス波で実験を行った。使用した電

圧印加装置は WF1945B(NF 回路設計株)である。ハイブリッド配向の影響を見る実験では電圧  $V=0-10$  V, 周波数  $f=1, 10, 100$  Hz, デューティ  $D=5\%$  のパルス波で実験を行った。

実験は電圧印加による上部平板の駆動の様子を CCD カメラおよび PC を用いて撮像する。なお, 上部平板が透明であるため, 透過光観察では上部平板の移動の確認が困難である。そこで, 上部平板表面にインクで簡易的な目印を付けた。

### 3・3 実験精度の検証

#### 3・3・1 配向状態の確認

2章で取り扱った実験セルと比較して, 本章の駆動装置は上下ガラス平板を締結していないため, 駆動装置組み立て後にガラス平板の移動などの要因により, 適切な配向状態が得られていない可能性がある。そのため, 配向状態を確認する必要がある。図 3-7 は組み立て後の駆動装置を偏光顕微鏡で透過光観察したものである。図 3-7(a)は偏光板

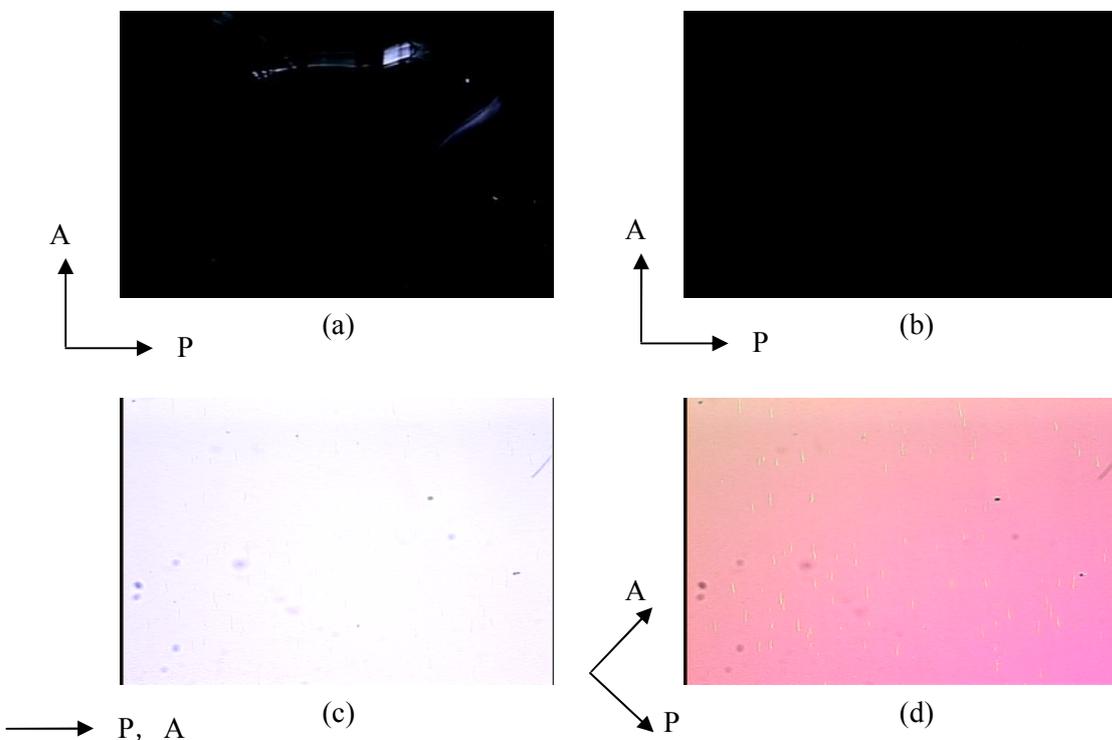


Fig. 3-7 Transmitted light observation

をクロスニコル状態にし、偏光子に対して液晶の光学軸を平行に配置したものである(ノーマリーブラック). 図の右上の領域で光が透過し、白くなっている箇所がある. すなわち、この箇所では配向不良が生じているといえる. 一方、図 3-7(b)は同じ観察方法で別の駆動装置の観察写真である. 図のように視野全域が完全に暗転し、透過光が一切認められない. このことから、この駆動装置の液晶分子の配向状態は均一に配向できているものと思われる. 図 3-7(c)は図 3-7(b)の駆動装置を検光子を偏光子に平行になるように配向させた状態である(ノーマリーホワイト). この場合、入射光をすべて透過するため、視野は明視野となる. 図中の黒い点はカメラに付着した塵と思われる. なお、実際の実験状況は図 3-7(d)のようなクロスニコル状態を液晶分子光学軸に対して  $45^\circ$  傾けた状態で行う.

### 3・3・2 空間分解能

上部平板駆動の実験は 2 章の可視化実験と異なり、上部平板上の目印を捉えるため、撮像領域が広い方が望ましい. そのため、対物レンズ 10 倍を使用した. 対物レンズ 10 倍での CCD カメラの撮像領域は  $480 \times 360 \mu\text{m}$ 、画素数は  $640 \times 480$  ドットであるので、 $x$ - $z$  平面内の空間分解能はおよそ  $0.75 \mu\text{m}$  である.

### 3・3・3 平板間隔の測定

上部ガラス平板は流動による運動を極力妨げないようにするため、何らかの方法で下部ガラス平板と締結されているわけではない. そのため、上部平板と下部平板の間隔は液晶と液晶中のスペーサのサイズによって決定される. しかしながら、実際に平板間隔がスペーササイズと同程度の厚みになっているかを検証する必要がある. そこで、以下のような方法で平板間隔を測定した.

- ① 偏光顕微鏡レンズを 20 倍に変更し、偏光顕微鏡のハネノケコンデンサレンズを外す
- ② 上部ガラス平板内壁部表面の傷に焦点を合わせ、そのときの顕微鏡微動ハンドルの値を読み取る.
- ③ さらに、同様の方法で下部ガラス平板内壁表面の傷に焦点を合わせ、顕微鏡微動ハンドルの値を読み取る.

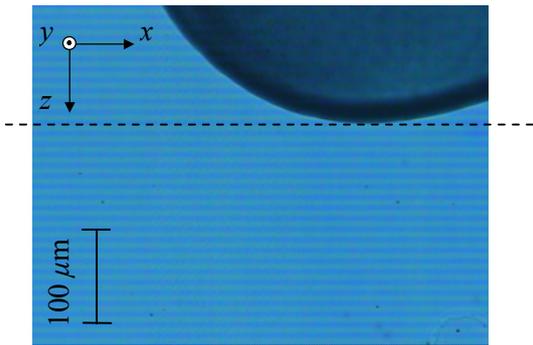
- ④ 上記②, ③で得られた微動ハンドルの値の差を, ガラス・液晶の屈折率を考慮して, 補正值 1.5 倍することで平板間隔を得る.

この手法で得られた, 平板間隔は  $9.5 \mu\text{m}$  から  $10.5 \mu\text{m}$  程度であり, スペーササイズと同程度であることがわかる.

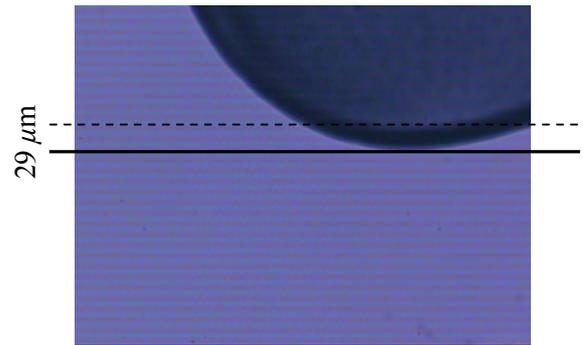
### 3・3・4 画像解析

図 3-8 は印加電圧  $V = 10 \text{ V}$ , 周波数  $f = 10 \text{ Hz}$ , デューティ比  $D = 5\%$  の条件での CCD カメラで取得した実験動画の 5 frame ごとの静止画像である. 上部平板運動の様子は図の黒い箇所, 上部ガラス平板上に付けた目印の移動の様子を解析することで取得する. 電場印加後上部平板状の印は時間経過とともに  $z$  方向に移動していることがわかる. また, 時間経過とともに, 視野色が変化していることがわかる. これは電場印加により液晶分子が立ち上がる時, 任意の波長を強く透過するため生じる. この色変化の周期は電場印加の周期と同じであり,  $f = 10 \text{ Hz}$  のこの結果では 0.5 秒(実際には 3 frame)ごとにその周期が確認できる. 図より上部平板は電場印加開始から  $t = 0.66$  秒後におよそ  $29 \mu\text{m}$  移動していることがわかる. その後, 0.66 秒後ごとに  $t = 0$  からの移動量を見ると  $l = 58, 86 \mu\text{m}$  とほぼ同じ増加量で移動していることがわかる. この運動の様子を解析した結果が図 3-9 である. 図 3-9 には比較のため周波数  $f = 1, 100 \text{ Hz}$  の結果も併記している. 図より, 上部平板の各周波数の移動量は時間に関して線形に増加していることがわかる.  $f = 1 \text{ Hz}$  の場合, 上部平板は 1 秒間に  $l = 4 \mu\text{m}$  移動している.  $f = 10 \text{ Hz}$  の場合, 1 秒間に  $l = 40 \mu\text{m}$ ,  $f = 100 \text{ Hz}$  の場合,  $l = 114 \mu\text{m}$  程度移動していることがわかる. この結果から上部平板の移動量の増加率は周波数の増加率に対して, 比例関係にない.

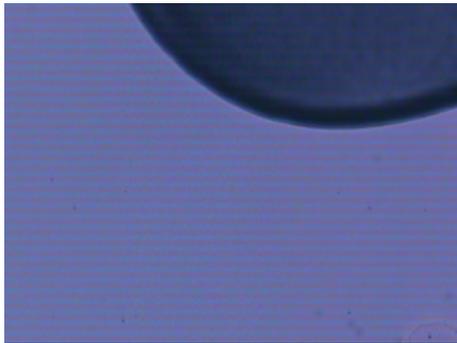
今回の実験では電圧周波数および電圧強度が上部平板移動速度に与える影響を調べることを目的としており, 上部平板の移動速度で解析結果を整理する必要がある. 上部平板移動速度は図 3-9 のグラフの傾きから得ることができる. 本実験では単位時間あたりの速度を移動量の中心差分で取得し, さらにその結果を時間方向に平均して, 上部平板の移動速度を取得した.



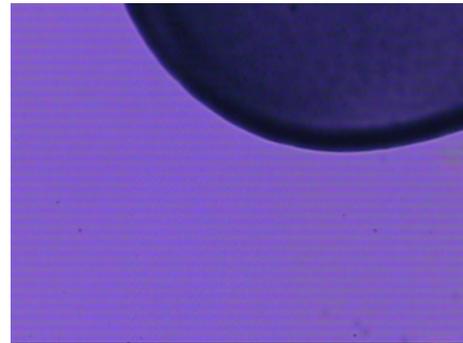
$t = 0\ \text{s}$



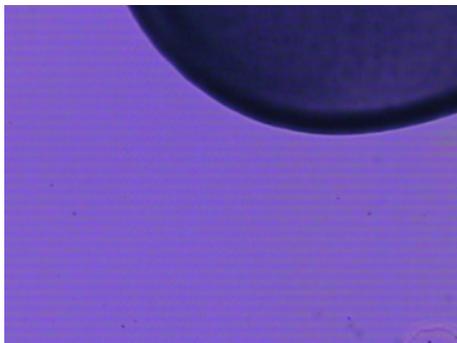
$t = 0.66\ \text{s}$



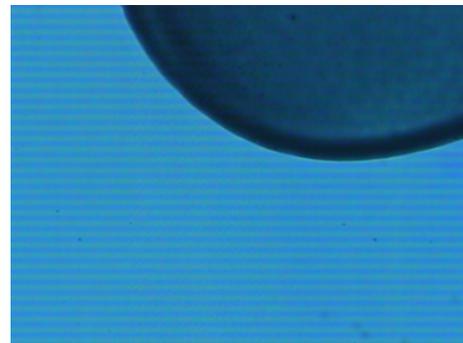
$t = 0.166\ \text{s}$



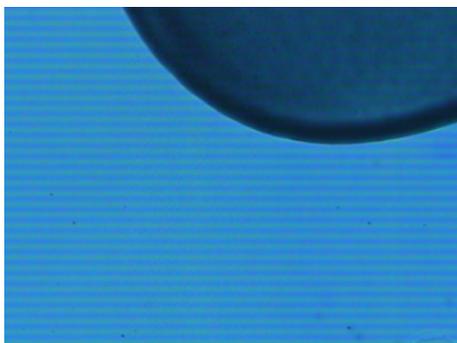
$t = 0.83\ \text{s}$



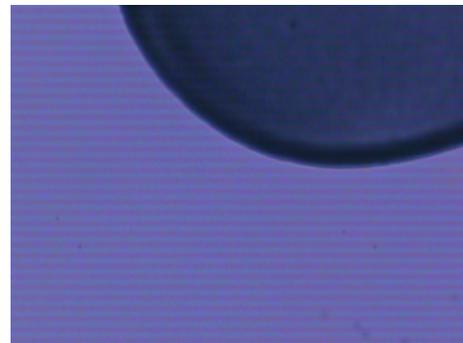
$t = 0.33\ \text{s}$



$t = 1.00\ \text{s}$



$t = 0.5\ \text{s}$



$t = 1.16\ \text{s}$

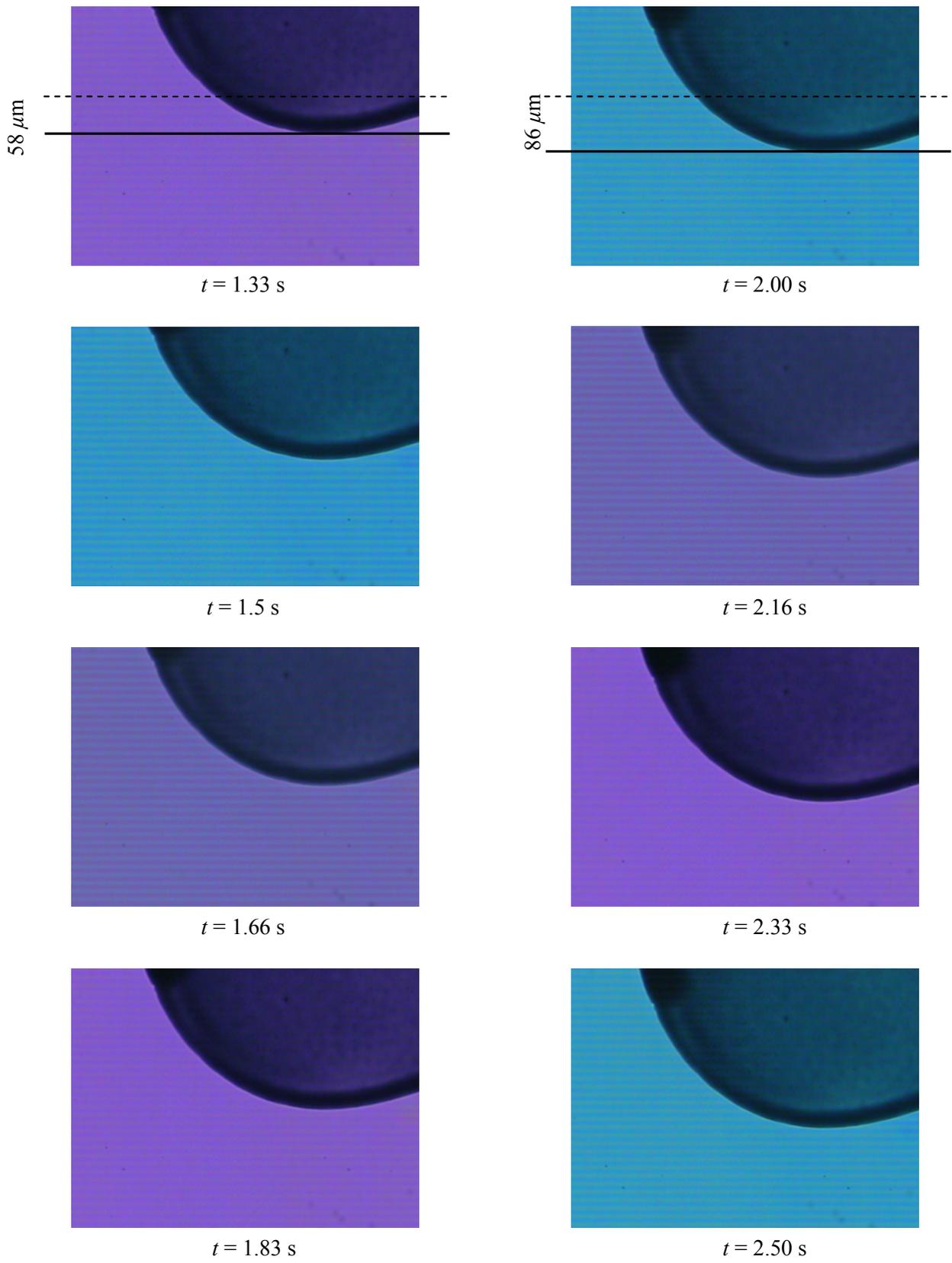


Fig. 3-8 Motion of the upper plate

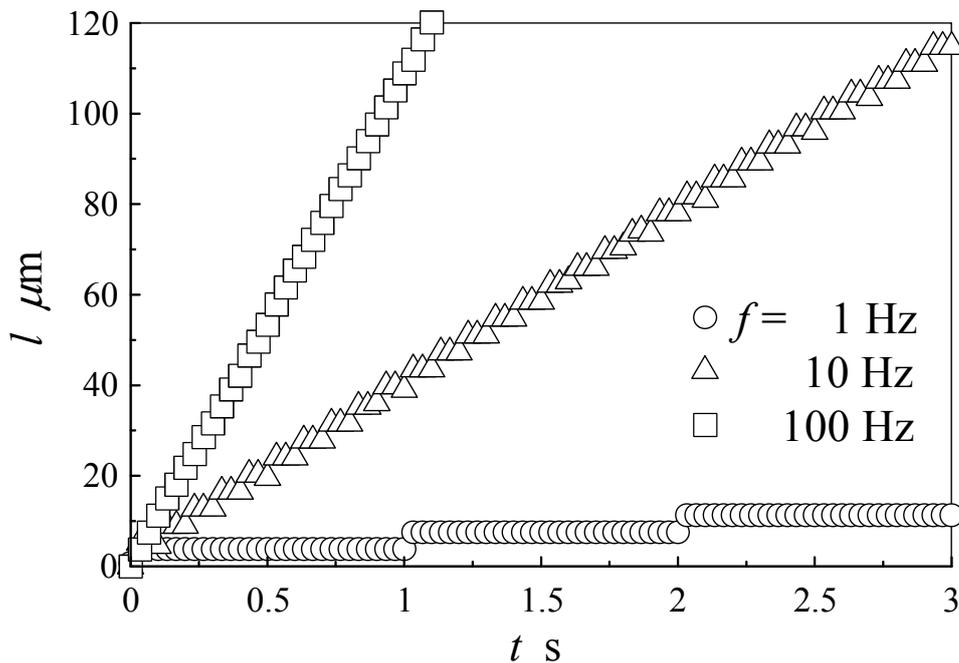


Fig. 3-9 Moved distance of the upper plate

### 3・4 実験結果および考察

図3-10に電圧  $V = 10$  V で周波数を  $f = 1$ -1000 Hz の条件で変化させた 実験結果の一例を示す. 図の横軸は印加周波数  $f$  Hz, 縦軸は各周波数における上部平板駆動速度  $U$   $\mu\text{m/s}$  を示す. 図のように上部平板の駆動速度は周波数の増加に伴い  $f = 100$  Hz まで増加し, その後, 周波数の増加に伴い減少することがわかる. しかしながら, 図 3-10 のように上部平板駆動速度の変化が周波数の変化に対して, ある規則性を持って変化する例もあれば, 図 3-11 のように周波数の増加に対して, 規則性を持っていない例も存在する. これは, 周波数を変化させるごとに上部平板の  $x$ - $z$  面での駆動開始位置を戻さずに上部平板を動作・停止を繰り返し実験を行っているためである. すなわち, 測定ごとに上部平板と下部平板の  $x$ - $z$  面での相対位置は上部平板の駆動によりずれていく. これにより, 例えば表面の凹凸へのスペーサ粒子のはまり込みが起こった場合でも, 次の周波数での測定を行っていることが主因であると考えられる. 逆に, 測定ごとに上部平板位置を戻した場合, 外力によりギャップの変化が生じてしまう. そこで, 駆動装置および  $x$ - $z$  面での相対位置変化の影響を緩和するため, 駆動装置を複数用意し, 各々の実験結果を平均化することで実験結果とした.

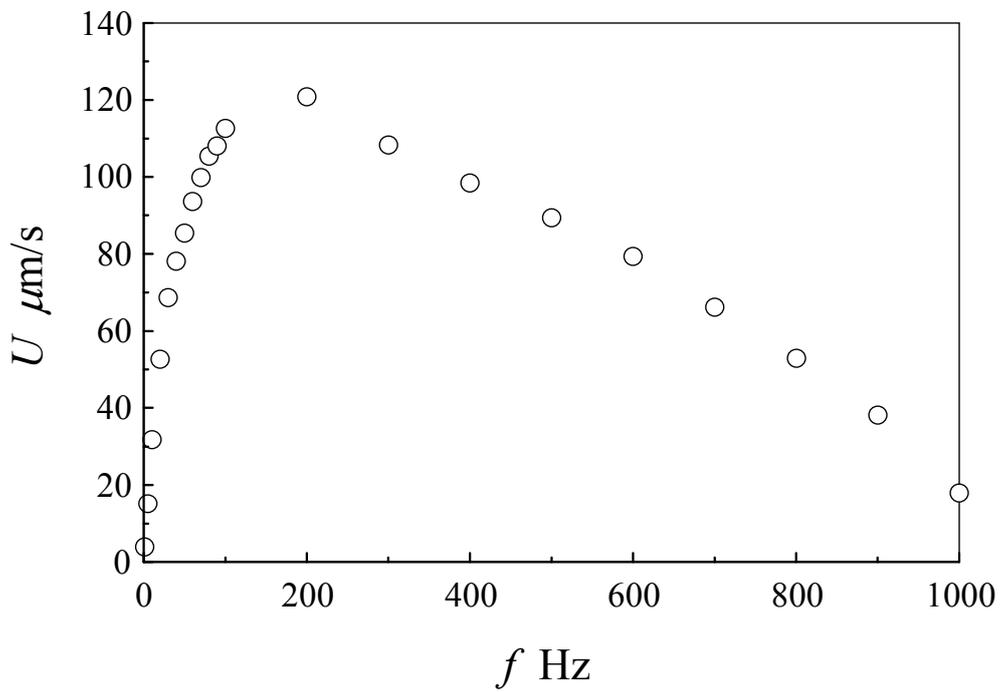


Fig. 3-10 An example of the effect of the frequency

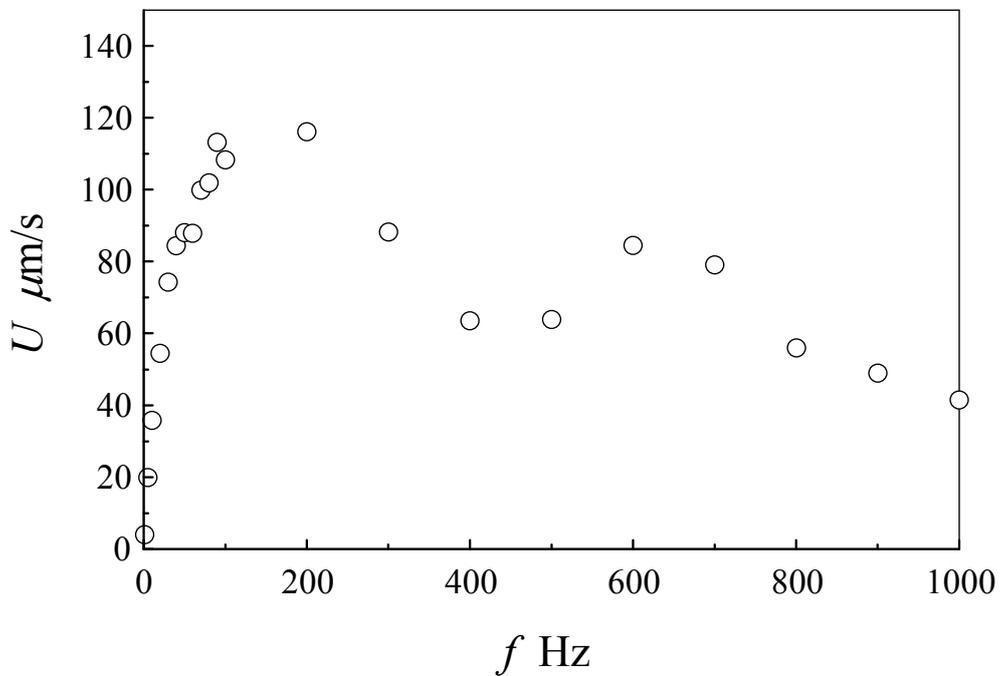


Fig. 3-11 An example of the effect of the frequency

### 3・4・1 印加周波数の影響

図 3-12 に印加電圧  $V=10\text{ V}$ ，デューティ比  $D=5\%$  で周波数を  $f=1\text{--}1000\text{ Hz}$  に変化させたときの上部平板移動速度の変化を示す．図の横軸は電圧印加周波数  $f$  を示し，図の縦軸は各周波数での上部平板移動速度  $U\text{ }\mu\text{m/s}$  を示す．図のプロットは 10 回の実験の平均値をエラーバーとともに表示している．図に示すように周波数に応じてプロット領域を 2 つに分割する．A の領域では上部平板の移動速度は周波数の増加に伴い，急峻に増加していることがわかる． $f=100\text{ Hz}$  以降から，増加の傾きは緩やかになり  $f=175\text{ Hz}$  で最大値  $U=117\text{ }\mu\text{m/s}$  を示す．B の領域では上部平板の移動速度は周波数の増加に伴い，緩やかに，しかも線形に減少していくことがわかる．

図 3-13 は図 3-12 の結果から得られた各周波数における電圧 1 パルスあたりの上部平板の移動量を示したものである． $f=1, 5, 10\text{ Hz}$  に関して大小関係にばらつきが生じているが，全体的に周波数の増加に伴い，1 パルスあたりの移動量が減少する傾向が見られる．1 パルスあたりの移動量の減少は  $f=1\text{--}50\text{ Hz}$  にかけて著しく，それ以降緩やかな傾向となる．

上記の結果より，上部平板駆動速度は印加電圧周波数に大きく影響することが明らかにされた．図 3-12, 3-13 より上部平板駆動速度および 1 パルスあたりの移動量は周波数入力によって任意に制御可能であることがわかる．すなわち，図 3-12 の B 領域の周波数入力を用いることで上部平板駆動速度を緩やかに制御でき，かつ 1 パルスあたりの移動量を極端に小さくできることから，高分解能駆動が可能であり，位置決め精度の高いマイクロアクチュエータの開発が可能である．

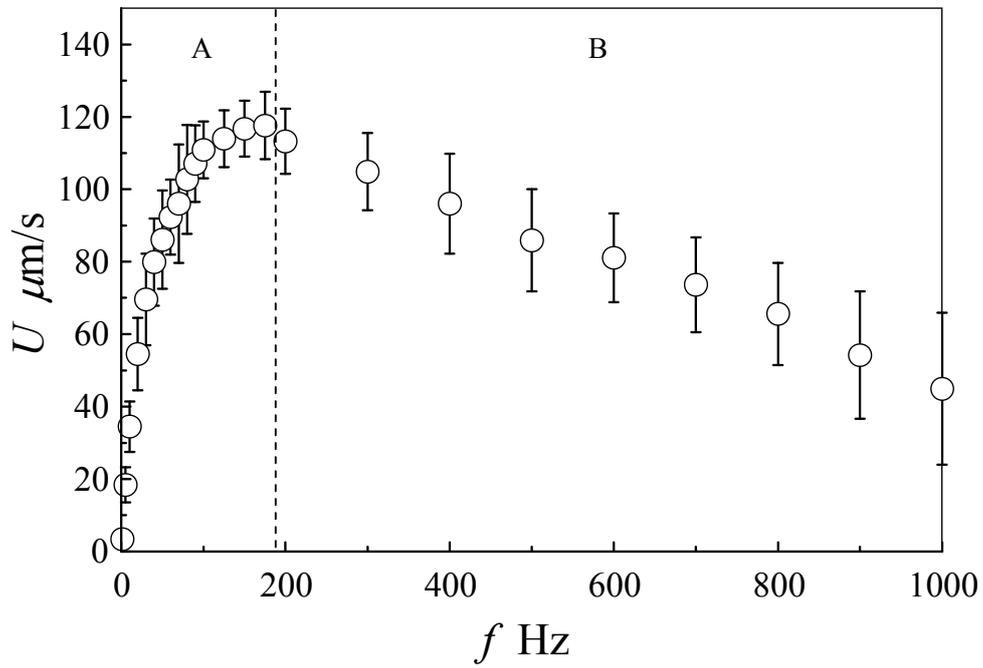


Fig. 3-12 Effect of the frequency on the moving velocity of the upper plate

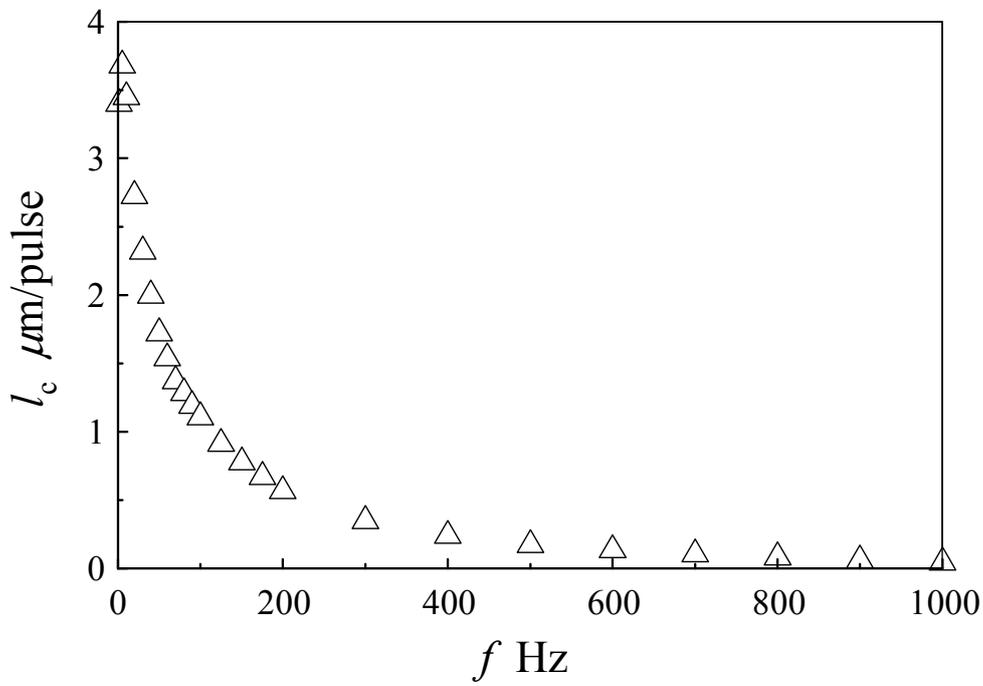


Fig. 3-13 Moved distance of the upper plate per 1 pulse

### 3・4・2 印加電圧の影響

図 3-14 に印加周波数  $f=1, 10, 100$  Hz, デューティ比  $D=5\%$  で電圧を  $V=0-10$  V に変化させたときの上部平板移動速度の変化を示す. 図の横軸は印加電圧  $V$  を示し, 図の縦軸は各印加電圧における上部平板移動速度  $U \mu\text{m/s}$  を表す. 図のプロットは 10 回の実験の平均値をエラーバーとともに表示している. 図より上部平板は印加電圧  $V=4$  V から動き始め, 電圧の増加に伴い移動速度が増加する傾向を示した. 各周波数に注目すると,  $f=1$  Hz は電圧の増加に伴う増加量は僅かである.  $f=10$  Hz では  $V=4-7$  V にかけて比較的大きな増加が見られるが, それ以降穏やかな増加傾向をとる.  $f=100$  Hz では  $V=4-7$  V にかけて著しい増加が見られ, それ以降傾きが減少する. 印加時間内に分子が十分に回転しきる  $V$  を超える電圧印加をしても, 回転終了後の電圧印加時間が増加するだけであり, 流動が発生しない(すなわち, 駆動に寄与しない時間が増加するのみであると考えられる). この結果より, 液晶駆動型アクチュエータは印加電圧を増加させる程, 駆動速度が増加し続けることはない.

ここで注目すべき点は,  $V=4$  V と従来の数十 V から数 kV で駆動する流体アクチュエータと比較して非常に低電圧で駆動することが可能である点である. 駆動電圧が低い

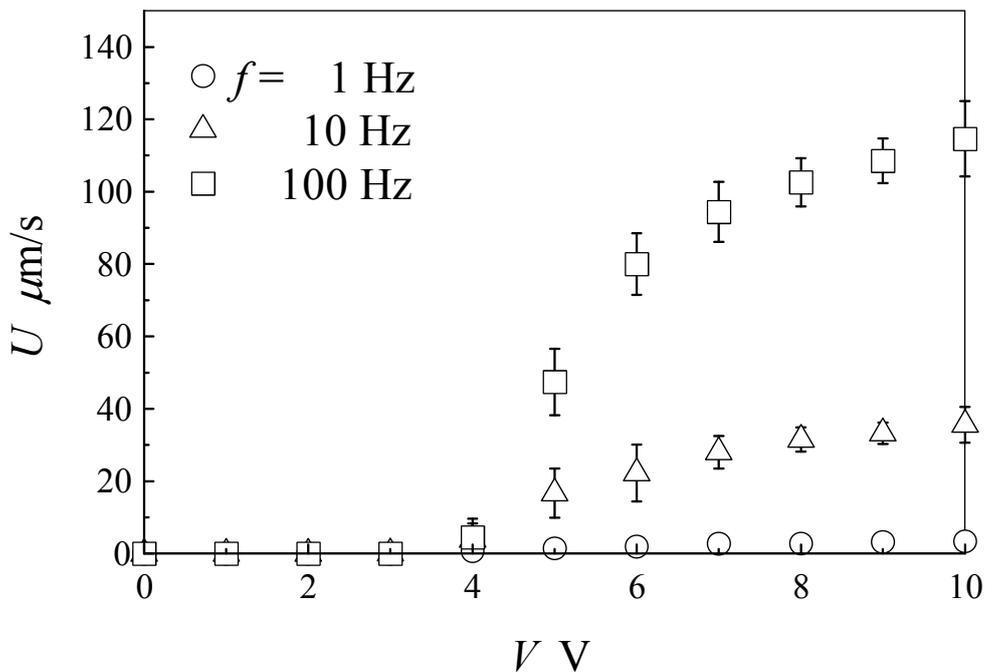


Fig. 3-14 Effect of the applied voltage on the moving velocity of the upper plate

ことは電源システムの構成を簡略化できる他、極小化に伴う電荷遮蔽処理を簡略化でき、小型化に対して優位に働く。また、前節同様に印加電圧を適切に選択することで上部平板駆動速度を制御でき、高分解能駆動が可能と考えられる。

### 3・4・3 ハイブリッド配向の影響

図 3-15 に印加周波数  $f=1, 10, 100$  Hz, デューティ比  $D=5\%$  のときのハイブリッド配向における上部平板の移動の様子を示す。ハイブリッド配向の場合、図 3-9 の結果と比較して上部平板の駆動速度が明らかに遅く、周波数の増加による移動量の増加傾向は異なる。電場印加後、 $t=3$  s で上部平板移動量は  $l=9, 72.5, 81 \mu\text{m/s}$  ( $f=1, 10, 100$  Hz) であり、 $f=10$  Hz と  $100$  Hz で上部平板移動量に差が見られない。すなわち、これらの周波数ではほぼ同じ駆動速度を持つことがわかる。水平配向と比較して、ハイブリッド配向の上部平板駆動速度が遅い理由は液晶分子の回転量に起因するものと思われる。2・4・4 節で示したようにハイブリッド配向の液晶分子は  $y$  方向に連続的に配向角を変化している。そのため、一部の液晶分子は水平配向の液晶分子と比較して、電場方向までの回転量が減少している。例えば、 $y=5 \mu\text{m}$  の位置の分子の初期配向角は約  $45^\circ$  であり、電場方向に分子が向くのに要する回転量は  $45$  度である。実際に背流の総量（背流の時間積分値）が回転量に依存することを考えると、回転量が小さいことが駆動速度の減少につながったと考えられる。

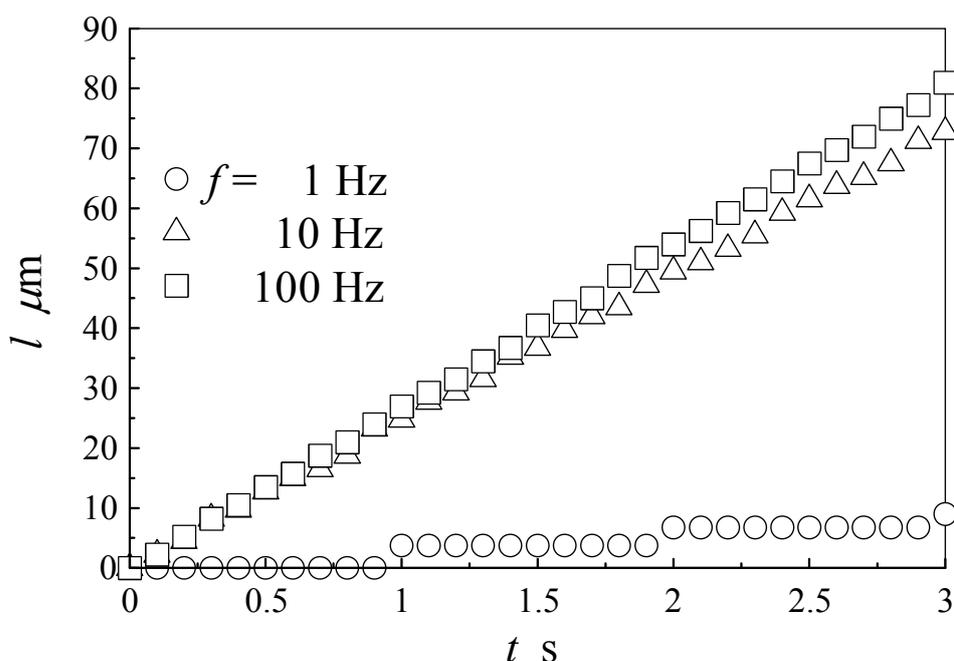


Fig. 3-15 Moved distance of the upper plate (hybrid mode)

図 3-16 は印加周波数  $f = 10 \text{ Hz}$ , デューティ比  $D = 5\%$  で, 印加電圧を  $V = 0-10 \text{ V}$  に変化させたときの上部平板移動速度の変化を水平配向とハイブリッド配向でそれぞれ示す. 図 3-15 に示した結果同様に, ハイブリッド配向は水平配向と比較して上部平板駆動速度が遅く,  $V = 10 \text{ V}$  の場合, 水平配向は  $U = 36 \mu\text{m/s}$  であり, ハイブリッド配向は  $U = 23 \mu\text{m/s}$  である. 低電圧領域に注目すると  $V = 4 \text{ V}$  以下の領域でハイブリッド配向の駆動速度の方が速く,  $V = 4 \text{ V}$  で水平配向は  $U = 12 \mu\text{m/s}$  であり, 水平配向は  $U = 4 \mu\text{m/s}$  である. また, 水平配向は 3・4・2 節で述べたように  $V = 4 \text{ V}$  から駆動するが, ハイブリッド配向の場合,  $V = 3 \text{ V}$  から駆動する. このように, 低電圧の領域でハイブリッド配向が水平配向よりも駆動速度が速い理由として以下のように考えられる.

電圧印加時の分子長軸の電場方向への回転は, 水平配向の場合, ある閾値  $V$  を超えて電圧印加したときのみ生じる. そのため, 水平配向の場合は閾値電圧を十分に超える電圧を印加しない限り, 上部平板は駆動しない. 一方, ハイブリッド配向の場合はその初期配向状態ゆえに閾値電圧が理論上存在しない. そのため, ハイブリッド配向は低電圧印加時に水平配向よりも速い駆動速度を発生させたと考えられる.

これらの結果と 2・4・3 節, 2・4・4 節の結果を総合すると, ハイブリッド配向は液晶マイクロアクチュエータを開発する上で有効な配向状態の一つといえる. マイクロサイズの部品への配向処理を簡略化できる他, 印加電圧を低減することができ, 水平配向

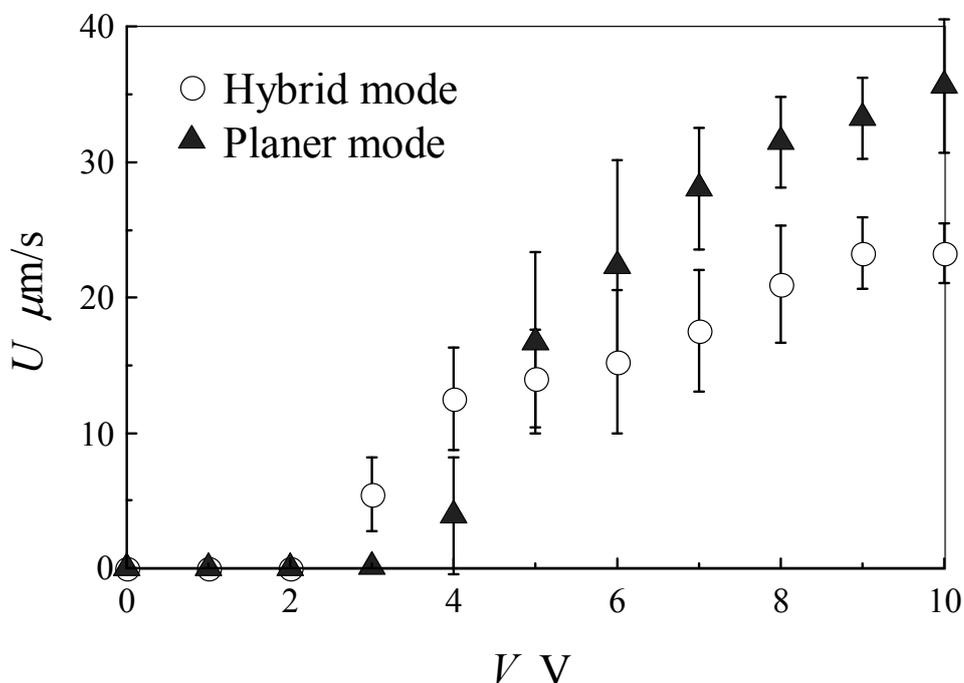


Fig. 3-16 Effect of the aligning mode on the driving voltage

と比較して減少した駆動速度はマイクロ化に伴う平板間隔の減少によって補うことができ、マイクロアクチュエータの実用化に期待が持てる。

### 3・5 結言

本章では2章で取り扱った背流を利用した物体移動実験を行い、電圧印加条件および電圧印加時における配向状態の影響を明らかにした。以下に得られた結果を示す。

- (1) 液晶アクチュエータに電圧を断続的に入力することで発生する背流により、上部平板を駆動させることに成功した。また、上部平板の移動は時間に関して線形であり、液晶アクチュエータは時間に関してリニアリティのある駆動特性を有する。
- (2) 上部平板駆動速度の増加率は印加電圧周波数の増加に関して、線形に増加しない。上部平板駆動速度は $f=175\text{ Hz}$ まで急峻に増加し、最大値 $U=117\text{ mm/s}$ を示した後、緩やかに減少する。
- (3) 入力周波数を選択することで、上部平板駆動速度を制御できる他、1パルスあたりの移動量を制御することができ、高分解能駆動が可能であることが明らかにされた。
- (3) 水平配向の場合、上部平板は $V=4\text{ V}$ から駆動し、印加電圧の増加とともに駆動速度が増加し、 $V=10\text{ V}$ 、 $f=100\text{ Hz}$ で $U=112\text{ }\mu\text{m/s}$ である。これは、数十Vで駆動する流体アクチュエータと比較して、低電圧で駆動できることを示し、マイクロアクチュエータを開発する上で有利に働く。
- (4) ハイブリッド配向の場合、上部平板は $V=3\text{ V}$ から駆動し、印加電圧の増加とともに駆動速度が増加する。また、 $V=4\text{ V}$ 以下の領域ではハイブリッド配向は水平配向の駆動速度よりも速く、 $V=4\text{ V}$ 、 $f=100\text{ Hz}$ のとき、ハイブリッド配向は $U=12\text{ }\mu\text{m/s}$ であり、水平配向は $U=4\text{ }\mu\text{m/s}$ である。このため、ハイブリッド配向は低電圧入力による駆動に有利な点を有する。

## 4 章 総括

本研究では、電場印加時における平行平板間内に生じる背流を、可視化法を用いて実測した。また、L-E 理論を用いた数値シミュレーションを行い、実験結果と数値計算結果の比較・検討を行った。さらに、背流を利用した物体の駆動実験を行い、電場印加時の印加条件が駆動速度に与える影響について調べた。以下に得られた結果を示す。

- (1) 平行平板間内の背流の様子は、可視化微粒子を適量分散させた液晶を用いることで可視化でき、速度分布の実測に成功した。
- (2) ツイスト角  $\phi_w$  を増加させることで、平板間内に生じる背流の速度分布は分布形状を  $x$  方向では S 字分布形状から、一方向流動に変化させた。  $z$  方向では上下で速度領域の大きさが正負で異なる S 字分布から、反対称な S 字分布形状となった。また、ツイスト角の増加に伴い、 $x$  方向、 $z$  方向ともに発生する背流の速度が増加することが明らかとなった。これは、ツイスト角の付与とともに、平板間の液晶分子に配向こう配が生じたことで、電場印加時の分子回転によって生じる流動が隣接する分子による流動と相殺されなくなったためと考えられる。
- (3) 印加電圧  $V$  を増加させることで、平板間内に生じる背流の速度は増加することが明らかとなった。印加電圧を増加させることで平板間の電場強度  $E = (V/H)$  は増加する。この電場強度  $E$  は L-E 理論の支配方程式の運動方程式、角運動方程式にあるように液晶分子の回転に寄与し、他の項との影響もあるが単純に発生速度を増加させたい場合、 $E$  を増加させることで達成できることが明らかとなった。
- (4) 平板間隔  $H$  を減少させることで、平板間内に生じる背流の速度は増加することが明らかとなった。電場強度  $E$  を増加させたい場合、印加電圧  $V$  を増加させる代わりに、平板間隔  $H$  を減少させることで、発生する背流の速度を増加させることができる。これは液晶をマイクロアクチュエータの駆動源として利用する本研究において非常に重要であり、必然的に小型化(平板間隔の減少)を伴うマイクロアクチュエータ開発に有利に働く
- (5) 電場強度  $E$  が一定の場合、印加電圧が高い方が背流の速度が増加することが明らか

かとなった。電場強度が一定の場合、電場印加時の定常時における壁面近傍の配向分布は同じ形状を示す。背流の発生、大きさに寄与するのは液晶分子の配向こう配とその時間変化であり、配向こう配が同じ場合は同じ大きさの流動を発生できる。しかしながら、平板間隔が小さい場合、平板間隔に対する速度こう配が増加するため、粘性応力が増加し、粘性応力と釣り合うように最大速度が減少する。そのため、同じ電場強度であっても平板間隔が小さい場合、発生する背流の速度は減少する。

- (6) チルト角が平板間隔方向に連続的に変化しているハイブリッド配向では平板間に発生する背流の速度は著しく増加する。また、最大速度の発生する時刻が水平配向と比較して非常に早い。これは、ハイブリッド配向は初期配向状態から配向こう配を有し、隣接する分子同士で回転による流動を相殺しないためである。加えて、電場によって液晶分子に働くトルクが最大となるのは電場ベクトルと液晶分子の配向角が  $45^\circ$  となったときであり、ハイブリッド配向では初期配向状態で配向角  $\theta_0 = 45^\circ$  で配向する液晶分子が存在する。そのため、電場印加直後からハイブリッド配向の液晶分子の一部は最大トルクで回転し、背流を生み出す。そのため、最大速度が電場印加直後に発生するという速い応答性を示した。
- (7) ハイブリッド配向の速度分布を除いて、可視化法を用いた背流の速度分布は L-E 理論を用いた数値シミュレーション結果と定性的によく一致した。ハイブリッド配向の結果に関しては、微粒子のある時刻の位置を比較することで定性的に一致することが確認された。この結果から、L-E 理論を用いた背流の予測シミュレーションは平板間内に生じる背流の速度分布形状をよく表現できており、実験では測定しにくい分子挙動や、せん断応力などの分析に有効な手段となる。
- (8) 実験セルの上下ガラス平板の締結部を除去した駆動装置を用いることで、背流のせん断力による上部平板駆動に成功した。また、平板間に矩形波電圧を繰り返し入力することで上部平板を連続的に駆動させることに成功した。
- (9) 周波数を増加させることで電圧印加回数を増加させることができ、それにより上部平板駆動速度は増加する。しかし、最大速度を示した周波数以降では上部平板駆動速度は緩やかに減少する傾向を示した。

- (11) 印加時間内に分子が十分に回転しきる  $V$  を超える電圧印加をしても、回転終了後の電圧印加時間が増加するだけであり、流動が発生しない。そのため、液晶駆動型アクチュエータは印加電圧を増加させる程、駆動速度が増加し続けることはない。
- (12) ハイブリッド配向状態で上部平板を駆動させた場合、その駆動速度は同条件における水平配向よりも劣る。しかしながら、 $V = 3\text{-}4\text{ V}$  程度の低電圧印加の場合、上部平板駆動速度はハイブリッド配向条件の方が水平配向条件より速い。これはハイブリッド配向の場合はその初期配向状態ゆえに閾値電圧が理論上存在しない。そのため、ハイブリッド配向は低電圧印加時に水平配向よりも速い駆動速度を発生させたと考えられる。これらのことから低電圧駆動が望ましいマイクロアクチュエータ開発において、ハイブリッド配向は有効な配向状態であるといえる。加えて、ハイブリッド配向は配向処理を水平配向と比較して簡便に施行することができ、アクチュエータの小型化に有効である。

以上より、平行平板間内に生じる背流の速度分布形状を測定し、各種パラメータの変化が速度分布形状、大きさに与える影響を明らかにした。また、背流による上部平板駆動を確認し、印加電圧条件が上部平板駆動速度に与える影響について明らかにした。

本研究で取り扱った液晶駆動型アクチュエータは液晶の持つ流動性による形状適合性や、低電圧駆動、シンプルな構造を持つことから、マイクロマシンを駆動させるアクチュエータの選択肢となりえる。今後の研究により、従来にはない駆動特性を有するアクチュエータへの応用展開が期待される。

## 参考文献

- (1) Heilmeyer, G.H., Zanoni, L.A. and Barton, L.A., "Dynamic scattering: A new electro-optic effect in certain classes of nematic liquid crystals", Proc. IEEE, 1968, vol.56, pp.1162-1171
- (2) Sumitomo Chemical Company Co.,Ltd. "Online catalog".  
<[http://www.sumitomo-chem.co.jp/sep/022LCP/LCP\\_11tokucho.html](http://www.sumitomo-chem.co.jp/sep/022LCP/LCP_11tokucho.html)>(accessed 2009-1-25)
- (3) 文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 ブレイクスルーを生み出すアクチュエータ研究 第3回公開シンポジウム資料, 2006, 213p.
- (4) S. CHONO and T. Tsuji, "Development of Micro-Actuators Driven by Liquid Crystals (1<sup>st</sup> Report, Generation of Flow and Its Mechanism)", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, 2006, Vol. 72, No. 715, pp.656-661
- (5) S. CHONO and T. Tsuji, "Numerical analysis of characteristics of microactuators driven by liquid crystals", Chem. Eng. Sci., 2009, Vol.64, Issue 22, pp.4625-4631
- (6) de Gennes, P. G. and Prost J., "The physics of liquid crystals", 2nd ed, 1993, Oxford Clarendon Press., 616p.
- (7) 吉野勝美, 尾崎雅則, "液晶とディスプレイ応用の基礎", コロナ社, 373p.
- (8) 高重正明, "物性科学入門シリーズ「物質構造と誘電体入門」", 裳華房, 223p.
- (9) 折原宏, "液晶の物理", 内田老鶴圃, 247p.
- (10) Chandrasekhar, S., "液晶の物理学", 吉岡書店, 527p.
- (11) 例えば, 赤木和夫等, "液晶便覧" 液晶便覧編集委員会, 丸善, 645p.
- (12) 都甲康夫, "新規 LCD 作成方法とその特性に関する研究", 長岡技術科学大学博士論文, 1997, 128p.
- (13) S. Kuniyasu, H. Fukuro, S. Maeda, K. Nakaya, M. Nitta, N. Ozaki and S. Kobayashi, "The Strength of Rubbing Worked on Polyimide Films for Aligning Nematic and Chiral Smectic Liquid Crystals: Controlling Pretilt Angles and Some Electrooptic Performances of LCDs", Jpn. J. Appl. Phys., 1988, Vol.27, pp.827-829
- (14) M. Kakimoto, M. Suzuki, T. Konishi and Y. Imai, "PREPARATION OF MONO-AND MULTILAYER FILMS OF AROMATIC POLYIMIDES USING LANGMUIR-BLODGETT TECHNIQUE", Chem. Lett., 1986, Vol.15, No.5, pp.823-826
- (15) J. L. Janning, "Thin film surface orientation for liquid crystals", Appl. Phys. Lett., 1972, Vol.21, pp.173-174

- (16) Y. Iimura, J. Kusano, S. Kobayashi, Y. Aoyagi and T. Sugano, "Alignment Control of a Liquid Crystal on Photosensitive Polyvinyl alcohol Film", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, Vol.32, pp.L93-L96
- (17) 日経マイクロデバイス HP  
<<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20090916/175400/>>(accessed 2009-9-16)
- (18) Brochard, F., "Backflow effects in nematic liquid crystals", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1973, Vol. 23, pp. 51-58
- (19) Berreman and Dwight W., "Liquid-crystal twist cell dynamics with backflow", *J. Appl. Phys.*, 1975, Vol.46, pp.3746-3751
- (20) Lhuillier, D. and Rey, A. D., "Nematic liquid crystals and ordered micropolar fluids", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 2004, Vol.120, pp.169-174
- (21) P. Yeh and C. Gu, "Optics of liquid crystal displays", John Wiley & Sons, 1999, 438p.
- (22) Tokyo Chemical Industry Co., Ltd. "Online catalog". available from  
<<http://www.tokyokasei.co.jp/catalog/C1550.html>>. (accessed 2008-7-25)
- (23) Ericksen, J. L., "Anisotropic fluids", *Arch. Ration. Mech. Anal.*, 1960, Vol.4, No.1, pp.231-237.
- (24) Ericksen, J. L., "Conservation laws for liquid crystals", *J of Rheology*, 1961, Vol. 5, Issue 1, pp. 23-34
- (25) Leslie, F. M., "Some constitutive equations for liquid crystals", *Arch. Ration. Mech. Anal.*, 1968, Vol.28, No.4, pp.265-283
- (26) Liu, C., S. CHONO and T. Tsuji, "Development of Micro-actuators Driven by Liquid Crystals (2<sup>nd</sup> Report, Effect of Various Parameters)", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, 2006, Vol. 72, No. 721, pp.2235-2241
- (27) Gannon M. G. J. and Faber T. E., *Philos. Mag. A*, 1978, 37, pp.117-135
- (28) E.W.Becker. et al., "Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography galvanofforming and plastic moulting (LIGA process)", *J. Microelectron. Eng.*, Vol. 4, pp. 35-56, 1986
- (29) T. Kand, Y. Kobayashi, M.Kurosawa, "A Cylindrical Micro Ultrasonic Motor using a Micro-machined Bulk Piezoelectric Transducer", 2004 IEEE Ultrasonics Symposium, 2004, U4-K-1, pp.1298-1301
- (30) F. Arai, K. Motoo, T. Fukuda, and K. Kato, "Piezoelectric Properties of Lead-free  $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  Thin Films", *Appl. Phys. Lett.*, 2004, Vol.85, pp. 4217-4218

- (31) S. Yokota, R. Nishizawa, K. Takemura, K. Edamura, "Concept of a Micro Gyroscope Using Electro-Conjugate Fluid (ECF) and Development of an ECF Micro Gyro-Motor", J. of Robotics and Mechatronics, 2006, Vol.18, No.2, pp.114-120

## 本研究に関する論文および発表

### 投稿論文

1. 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣  
液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発 (第3報, 平行平板間速度分布の可視化)  
日本機械学会論文集 75巻 753号 B編 pp.71~76 (平成21年5月)
2. Takanori MATSUMI, Tomohiro TSUJI and Shigeomi CHONO  
Velocity profiles of liquid crystalline backflows between parallel plates  
under the electric fields                      Physics of Fluids, to be submitted

### 国際会議

1. Takanori MATSUMI, Tomohiro TSUJI and Shigeomi CHONO  
Effect of twist angle on back-flow profile in nematic cells, 21<sup>st</sup> International Liquid Crystal  
Conference, 685, Keystone (2006)

### 共同発表

1. Shigeomi CHONO, Tomohiro TSUJI, Kensaku ISHIMARU and Takanori MATSUMI  
Development of Liquid Crystalline Micro-Actuators, 1<sup>st</sup> International Symposium on  
Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, pp.67~70, Chiba (2006)

### 国内学会発表

1. 松見隆紀, 石丸賢策, 辻知宏, 蝶野成臣  
電場印加時における平行平板間ネマティック液晶の速度分布測定,  
日本機械学会 2005年度年次大会, pp.65~66, 東京 (2005)

2. 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣  
液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発(複合配向処理を用いた駆動方向制御),  
日本機械学会中国四国支部 第44期総会・講演会, pp.147~148, 広島 (2006)
3. 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣  
配向膜のパターニングによる液晶アクチュエータの駆動方向制御に関する基礎研究,  
第18回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp.409~410, 神戸 (2006)
4. 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣  
液晶駆動型マイクロアクチュエータの駆動方向制御,  
日本機械学会 2006年度 年次大会, pp.29~30, 熊本 (2006)
5. 松見隆紀, 倉敷宏州, 石丸賢策, 辻知宏, 蝶野成臣  
液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発 (駆動特性に及ぼす入力電圧の影響),  
日本機械学会中国四国支部 第45期総会・講演会, pp.139~140, 徳島 (2007)
6. 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣  
液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発 – 駆動特性に及ぼす壁面アンカリングの  
影響-, 日本機械学会 2007年度年次大会, pp.13~14, 大阪 (2007)
7. 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣  
液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発,  
日本機械学会流体工学部門複雑流体研究会, 第3回複雑流体研究会, 京都 (2008)
8. 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣  
液晶アクチュエータの駆動特性に与える入力電圧周波数の影響,  
日本混相流学会年会講演会, 会津 (2008)
9. 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣  
電場によって誘起される液晶流動の解析とアクチュエータへの応用,  
第4回日本流体力学会中四国・九州支部総会・講演会, 高知 (2009)

10. 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣  
ハイブリッドセル内における電場誘起液晶流れ,  
混相流学会年会講演会 2009, 熊本 (2009)

## 共同発表

1. 蝶野成臣, 辻知宏, 劉春波, 石丸賢策, 松見隆紀  
液晶のメカニクスとマイクロアクチュエータの開発,  
日本液晶学会討論会 2005, pp.233~234, 滋賀 (2005)
2. 蝶野成臣, 辻知宏, 松見隆紀  
科研費特定領域研究 438 「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」,  
第 2 回特定領域公開シンポジウム, 仙台, (2005)
3. 蝶野成臣, 辻知宏, 松見隆紀  
科研費特定領域研究 438 「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」,  
テクノフロンティア 2006・モーションエンジニアリング展, 千葉 (2006)
4. 蝶野成臣, 辻知宏, 松見隆紀  
地域研究開発促進拠点支援 (RSP) 事業 (研究成果育成型) (2005 年度)  
RSP 成果説明会, 高知 (2006)
5. 石丸賢策, 劉春波, 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣  
背流を利用した駆動装置の開発,  
日本液晶学会討論会 2006 年度年次大会, pp.49~50, 秋田 (2006)
6. 蝶野成臣, 辻知宏, 松見隆紀  
科研費特定領域研究 438 「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」,  
第 3 回特定領域公開シンポジウム, 岡山 (2006)
7. 田村和之, 松見隆紀, 三枝嘉孝, Alfeus SUNARSO, 辻知宏, 蝶野成臣  
ハイブリッドセルを用いた液晶アクチュエータの提案,

第 85 期流体部門講演，514，広島（2007）

8. 杉島司朗，松見隆紀，田村和之，辻知宏，蝶野成臣  
壁面配向処理が液晶アクチュエータの駆動特性に与える影響，  
第 20 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム，pp.287~290，大分（2008）

9. 片田雄大，松見隆紀，辻知宏，蝶野成臣  
平行平板間背流の速度分布，  
2008 年日本液晶学会討論会，京都（2008）

## 本研究に関する特許（公開）

発明者                   : 蝶野成臣， 辻知宏， 松見隆紀  
発明の名称             : “ハイブリッド液晶流動形成機構，ハイブリッド液晶流動形成方法  
                                  および液晶流動を用いたハイブリッド物体移動機構”  
公開番号                : 特開 2009-185993

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始、多大かつ明瞭なるご指導を賜りました高知工科大学システム工学群の蝶野成臣教授、辻知宏准教授に対し深く感謝を申し上げます。

蝶野教授においては、私を知能流体力学研究室に導いていただき、液晶研究のテーマをくださったことから私の研究が始まりました。蝶野教授と出会うことで、若輩であった私の研究に対する姿勢を成長させることができたと思っております。心より感謝申し上げます。

辻知宏准教授からは、液晶研究で特に有益なご助言、ご討論を賜りました。実験に関して、昼夜を問わず対応していただきました。また、私の体調管理不足による2週間の入院生活を強いられた際にも、お忙しい中見舞いに来てくださり、励ましの言葉をいただきました。辻知宏准教授との研究生活を通じて、物事に対する観察力・分析力を向上させることができたと思っております。これに関しては、就職に際し職務が変わることがあったとしても変わることはない私の財産となりました。心より感謝申し上げます。

審査におきましては、有益なご討論を賜りました、岡宏一教授、楠川量啓教授、古沢浩准教授に厚くお礼申し上げます。

最後に、知能流体力学研究室の皆様には日々ご協力を賜りましたことを感謝いたします。

2010年3月

松見 隆紀