

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560165

研究課題名（和文）電場を用いた液晶のビンガム特性の制御によるマイクロ機能性構造の創製とその流体応用

研究課題名（英文）Functional micro-structure of liquid crystals generated by controlling of Bingham like properties under electric fields, and its application for flow control.

研究代表者

氏 名：鳴海 敬倫 (NARUMI TAKATUNE)

所 属：新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20143753

研究成果の概要：条件により固体的な性質を発現するスメクティック液晶を用いて、電場印加方法を制御することにより、その固体的特性の強さを変化させて、流動性の低いところだけを残してマイクロ構造を創製する手法を検討した。特に、その流動させて構造を残す手法を確立するのに必要な変形発生時の過渡流動におけるスメクティック液晶の流動性の変化を検討し、流動発生後は電場タイプではなく、電場の有無が流動性に影響を与えることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：非ニュートン流，機能性流体，流動制御

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、これまで液晶を用いた ER デバイスの開発や、そのレオロジー特性の解明などを行ってきた。このように流動抵抗の制御による応用はある程度研究が進んでいるが、さらに先進的な応用に関する検討は多くない。研究代表者によるその一つの成果として、スメクティック液晶では電場により降伏応力を有する固体的状態が得られる点ならびにその降伏特性を電場の強さ、直流か交流かによって制御できることが見いだされた。これにより、流動制御のみへ応用では、なし得ない新たな機能性が発現できること

を着想した。そこで、本研究では相変化を容易に起こせ、また、流動状態にある流体の状態だけでなく、その固相になった状態の内部構造ならびにその形状まで制御出来るスメクティック液晶を用いて、例えば流路自体の形状の変更や流路表面のマイクロパターン化を行い、流動状態から固化時までの状態を利用した、全く新しい流体制御方法の開発を行うことを考えた。

2. 研究の目的

当初は、温度制御と微細パターン電極による電場制御により、スメクティック液晶に場

所により異なる状態変化を発生させ、液晶の一部を固相化したマイクロ構造を形成することを目的とした。

研究を進めていくことにより、上記の目標のためには弱い構造の部分を取り除くときの流動性の解明が重要であることが分かり、流動開始後の変形性の解明ももう一つの目的とした。

3. 研究の方法

4. 研究成果

上記の二つの目的で行った研究と成果をそれぞれの内容毎に分けて述べる。

(1) まず、内容としては基礎的となる後者の目的に対応した、スメクティック液晶を用いて、特に電場下で一定応力を印加し、変形開始時及び降伏後の変形挙動について調べた結果について述べる。

①供試流体

本実験には、温度によりネマティック相およびスメクティック A 相を示し、正の誘電異方性を持つ液晶 4-cyano-4'-octylbiphenyl (8CB)[ワコー・ケミカル(株)]を用いた。8CB は 42.6°C で等方相からネマティック相に、34°C でネマティック相からスメクティック A 相にそれぞれ変化する。また、24°C 以下では結晶相となる。実験は、スメクティック A 相が完全に発現すると考えられる 30°C で行なった。

②実験装置および実験方法

実験装置には電圧を印加できるように改造した平行円板型回転粘度計(HAAKE 社製 RS50)を用いた。装置の主要部を図 1 に示す。電圧は上部円板の軸にはめ込まれたステンレス製の液だめ中の電解液を介して印加できるようになっている。なお、金属製である上下円板は他の部分から絶縁されている。電圧供給にはファンクションシンセサイザとパワーアンプを用いた。本実験は二円板間

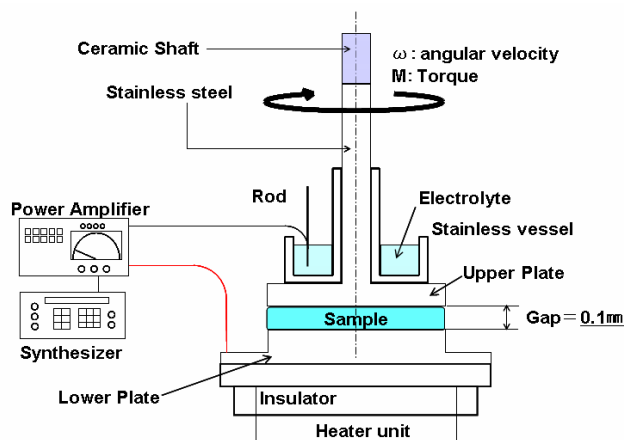


図 1 実験装置の主要部の概要

離を 0.1mm で行なっており、熱膨張による隙間変化をなくすために測定温度で隙間のゼロ点を取っている。試料は 38°C で二円板間に入れ、電場を印加したまま測定温度の 30°C まで冷却、そのまま 30 分静置した後に一定の応力を加えるスタートアップ実験を行ない、変形過程を調べた。このスタートアップ後に電場を印加したままにする ON-ON 実験と、電場を印加しない ON-OFF 実験を行った。さらに、試料を透過光で観察できるように上下プレートをガラス電極に置換し、同様の実験を行なった。ここで、本研究における応力・ひずみとしては、円板外周部での見かけのせん断応力・ひずみを代表値として用いている。また、スタートアップ実験の測定と同時に、電場下で形成された構造の一定応力下の変形・崩壊過程を、CCD カメラを用いて偏光下で撮影した。なお、印加電場は DC および AC, 1kHz の 0~1500V/mm, 印加応力は 10~120Pa まで変化させたが、ここでは 30Pa の場合について述べる。

③実験結果および考察

まず、過去の研究でも確認された 8CB の降伏現象について説明する。図 2 に、静止状態から応力を時間に対して一定の割合 (0.08Pa/s) で上昇させる stress-sweep 実験²⁾により得られた降伏応力の測定結果を示す。なお、ひずみが 1 を超え、急激な上昇を始める際の応力を降伏応力と定義している。このように、直流電場下では電界強度が上がると電気対流の影響で複雑な構造が形成されて降伏応力が上昇する。一方、交流電場下では一様な層構造が形成され、層間で大規模なすべり変形が生じ易くなり降伏応力が低下する。ここではこの降伏後の大変形について述べる。

図 3 に、一定せん断応力 ($\tau=30\text{Pa}$) 下のスタートアップ実験における実験結果を示す。横軸は応力印加後の時間、縦軸は円板外周部で見かけのせん断速度である。無電場の条件 (OFF-OFF) 下と電界強度が DC/AC, 1kHz の

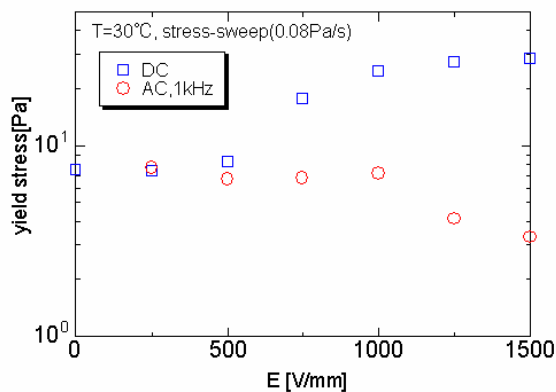


図 2 応力スweep試験により得られた降伏応力の電場依存性

1500V/mm の場合について示してある。まず、十分時間が経ったあとの定常状態について述べる。ON-ON の条件下では DC/AC の違いは見られず、同じ流動性を示している。これはネマティック相の場合とは異なり、対流が生じないため DC/AC によらず同じ流動構造が生じているためと考えられる。一方、スタートアップ後に OFF にした条件の実験ではどの場合も最終的には同じ流動性を示している。この定常までの変化は非常に特徴的であり、ON-ON の条件下では AC の場合、せん断速度は一気に上昇するが、定常状態に達するまでに若干の遅れが生じる。一方、DC の場合、非常に微小なせん断速度での変形後、ある時点で大変形が生じていることが分かる。一方、ON-OFF の条件下では、DC と AC の場合で逆の変化となる。これは、AC 下では秩序性が高く滑りやすい構造が崩壊して無電場下の流動構造に変化すると考えられ、DC 下ではよりランダムな構造からの変化と考えられる。定常状態までの過渡挙動を詳細

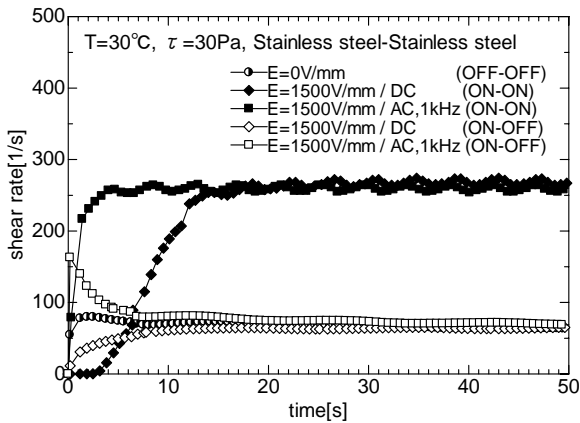


図 3 一定応力下のスタートアップ実験により得られたせん断速度の過渡応答($\tau=30\text{Pa}$)

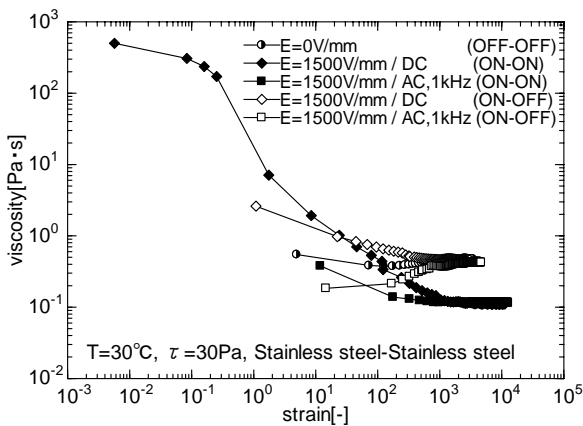


図 4 一定応力下のスタートアップ実験により得られた見かけの粘度変化のひずみ依存性 ($\tau=30\text{Pa}$)

に調べるために、同じデータをひずみに対してまとめた結果を図 4 に示す。横軸は見かけのひずみ、縦軸は見かけの粘度($\tau/\dot{\gamma}$)である。AC 下で ON-ON の条件以外は定常状態に到達するまでに 1000 程度のひずみを要することがわかる。定常流動では電場のタイプによらず同じ流動構造を有していると考えられるが、その状態に到達するために必要な変形量は大きく異なることになる。また、DC 下のひずみ 1 程度までの変形にも特徴が見られ、一定に近い比較的高い粘度を保った遅い変形後に急激な崩壊が生じていることがわかる。なお、定常粘度が電場印加によって低下しているのは、定常流動で見られる負の ER 効果に対応しているものと考えられる。ここでは示さないが、画像を検討した結果、DC の場合、細かい構造の崩壊が分布して生じており、構造を維持した変形と部分的な構造崩壊とが同時に起こり、このような変形特性を生じたと考えられる。一方、AC 下では変形に対する変化が見られない状況がしばらく続いた後に大規模な構造崩壊が生じた。

④まとめ

印加電場の条件により降伏応力を制御できるスメクティック液晶を用いて、大変形開始時の挙動について実験的に検討し、以下のような結果が得られた。(1)一定せん断応力を印加した場合、せん断速度が定常状態に達するまでの過渡過程には電場条件すなわち降伏前の構造の違いが大きく影響する。(2)直流電場を印加した場合、大変形前に比較的高い流動抵抗を示す微小な崩壊過程が生じる。

(2)次に、パターン電極を用いたマイクロ構造形成実験について述べる。以下の実験で用いた液晶は(1)と同じである。

①実験装置および実験方法

図 5 に示すよう微細パターンが施されたパターン電極を用いて、スメクティック液晶に場所により異なる状態変化を発生させ、液晶の固相化したマイクロ構造を形成した。その後、電場によ

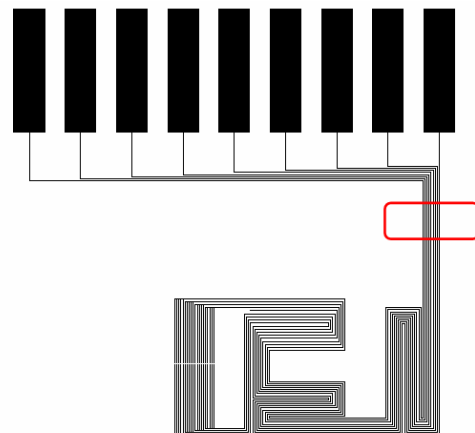


図 5 パターン電極 (使用場所: 赤枠内)

り形成された構造の比較的弱い部分を取り除くために遠心力などを印加した。さらに形成されたマイクロ構造の形状は高精度レーザ測定器を用いて測定した。変位測定の概略図を図6に示す。まず、恒温槽内の温度をネマティック相が発現している38℃に設定し、パターンガラス電極を温めた後、電極パターン上(図5の赤枠部)に試料を適量置く。電場を印加した後、恒温槽をスメクティックA相が発現している30℃まで冷却し、30分間静置する。その後、外力(重力または遠心力)を加え、形成されたマイクロ構造の凹凸パターンを計測した。

②実験結果および考察

実験結果の一例として、直流電圧及び交流電圧125Vを印加した結果を述べる。なお、電極線の間隔は50μmであるために、電界強度は2500V/mmとなる。外力の印加には遠心力を用い、回転数180rpmで15分間回転させた。なおサンプルは中心から約100mmの位置に設置した。その際にでき上がったマイクロ構造の凹凸パターンの測定結果を図7に示す。この結果を見る限りでは比較的強い構造を有すると考えられる直流部分が残し、比較的弱い構造を有すると考えられる交流部分が流れたように見受けられる。しかしながら、電極線の接続の入れ替えや、同様の条件で実験を再度繰り返したが、十分な再現性は得られなかった。

再現性が十分得られなかった原因として以下の点が考えられる。まず、遠心力を印加する現状

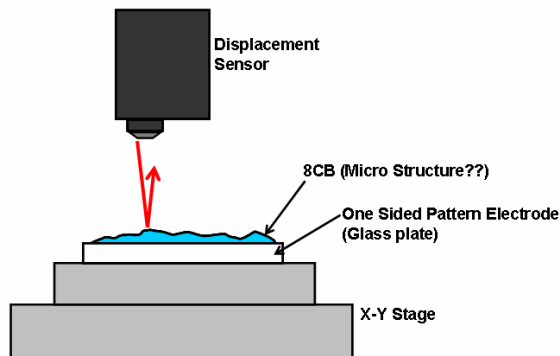


図6 変位測定概略図

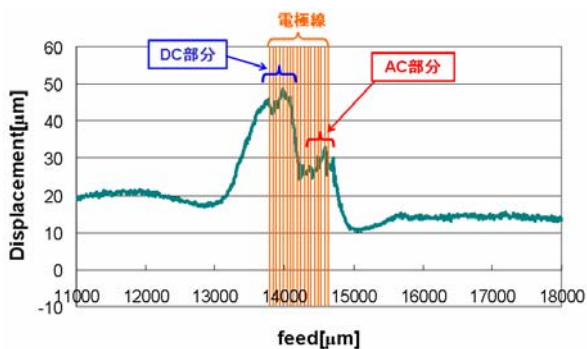


図7 形状測定結果の例

の装置では、電場を印加したまま回転させられないため(1)のON-OFF実験と同じ状態になるために流動が生じてしまうと構造に殆んど違いが出なかったことに因る。さらに、片側電極であるために電気力線の影響で、2平板で電場を印加するほど十分な電場が印加されていないことも一因と考えられる。

③まとめ

現時点では変形開始後の条件を十分にコントロールできないため再現性のある結果は得られていないが、これらの点の改善により、当初の目標は達成できると考えられる。

(3)最後にスリット流路内の構造制御を試み、流路形状を形成する実験について示す。ITOガラスで二次元流路を作製し、構造強度の比較的強い部分は残し、構造強度の比較的弱い部分は流すといった流動制御、配向による構造の制御を目指した実験を行なった。この場合も同じ液晶を用いている。

①実験装置および実験方法

実験装置は流路内面全面にITO被覆された流路と、スライドガラスを用いて作製した流路の2種類を準備した。その概形及び概寸を図8に示す。電圧は比較的弱い配向構造を形成すると考えられる交流電圧を印加した。この場合、比較のために交流電場よりも比較的強い配向構造を形成する無電場を用いた。実験方法は(2)とほぼ同じである。

②実験結果および考察

交流電場下では一様な層構造が形成され、無電場ではポリドメイン構造が形成されているとすれば、交流電場で形成された一様な層構造がすべり変形を起こし交流側だけ流れると予想できる。しかしながら、遠心力を負荷した交流電場を印加した流路及び、無電場の流路で大きな違いが見られなかった。

現状の装置では遠心力を負荷する際には電場を切らなくては回転させられないという状況であるために、(1)で明らかになったON-OFF実験の場合と同等になると考えられる。そのため、大変形が生じた際の配向構造は流動配向し、無

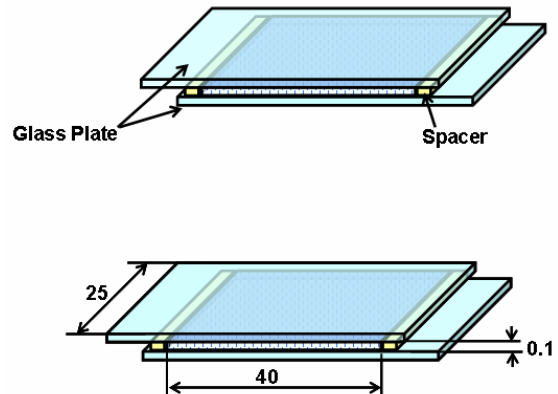


図8 平行平板型二次元流路の概形

電場と交流電場の ON-OFF 実験で最終的な構造の違いが現れなくなり、いずれの場合も流出したのではないかと考えられる。

③まとめ

(2)と同様に変形開始後の条件が無電場で同じになったため再現性のある結果は得られていないが、電場を印加したままの実験により、構造制御は可能と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① 上松仁, 鳴海敬倫, 長谷川富市, スメクティック液晶の降伏特性に対する電場の影響, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, CD-ROM, pp.1-4, 2007, 査読無
- ② 田中康昭, 鳴海敬倫, 長谷川富市, スメクティック液晶の電場と温度の制御による降伏特性の変化に関する研究, 日本機械学会北陸信越支部第45期総会・講演会講演論文集, pp.163-164, 2008, 査読無
- ③ T.Narumi, H.Uematsu, T.Hasegawa, Solid-like Properties of Liquid Crystal in Smectic Phase Controlled with Electric Field Applied, Proc. 15th Int. Congress on Rheology (ICR2008), CD-ROM, pp.484-486, 2008, 査読有
- ④ 上松仁, 鳴海敬倫, 長谷川富市, スメクティック液晶の電場下での降伏現象における構造変化, 日本流体力学会年会 2008 講演要旨集, CD-ROM, pp.1-3, 2008, 査読無
- ⑤ 上松仁, 鳴海敬倫, 長谷川富市, 電場下のスメクティック液晶の降伏特性と構造変化, 第56回レオロジー討論会講演要旨集, pp.178-179, 2008, 査読無
- ⑥ 岩波友彦, 鳴海敬倫, 萱場龍一, 長谷川富市, 電場を印加されたスメクティック液晶の一定せん断応力下の変形挙動に関する研究, 第57回レオロジー討論会講演要旨集, pp.258-259, 2009, 査読無
- ⑦ 岩波友彦, 鳴海敬倫, 長谷川富市, 電場下で一定応力を印加されたスメクティック液晶の変形開始時の過渡挙動, 日本機械学会第87期流体工学部門講演会講演論文集, CD-ROM, pp.243-244, 2009, 査読無

[学会発表] (計1件)

- ① T.Narumi, H.Uematsu, T.Hasegawa, Controllable yield property of liquid crystal in smectic phase with Electric fields applied, International Symposium on Fusion Technology (ISFT) 2009, Incheon, Korea.

6. 研究組織

(1)研究代表者

鳴海 敬倫 (NARUMI TAKATUNE)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 20143753