会場 G

領域 12

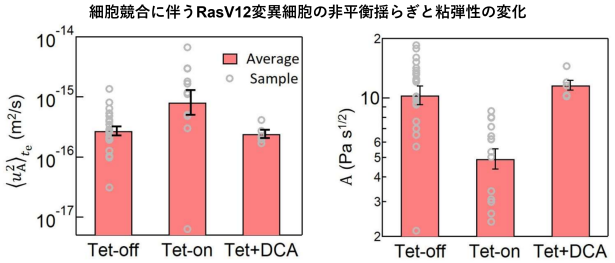
G-1　代謝阻害・細胞競合抑制下のがん細胞の粘弾性と非平衡揺らぎ

九大院理 [A]　田尾優樹[A], 永尾渉 [A], 水野大介 [A]

細胞質は、様々な高分子や細胞小器官から成る複雑な混み合系である。生細胞中では、代謝活動に伴う非平衡揺らぎなど特徴的な力学特性を示す一方、これらが細胞内・細胞間でどのように相互作用し、生命現象に影響するかは十分に分かっていない。

本研究では、正常細胞ががん化細胞を排除する細胞競合に着目し、マイクロレオロジー計測により、細胞質の粘弾性と非平衡揺らぎを測定した。

単独培養では正常細胞と RasV12 変異細胞はいずれも液体-個体相転移の臨界性を示唆する力学特性を示した。一方、共培養下の変異細胞では非平衡揺らぎが増大し、粘弾性が低下した。これはワールブルグ様代謝変化に伴う揺らぎの増大が、混み合った細胞質を流動化させるアクティブガラス的挙動と考えられる。さらに、この代謝変化を阻害すると力学特性が回復し、変異細胞の排除も抑制された。これらの結果は、代謝活動に伴う非平衡揺らぎが細胞質の流動性を変化させ、細胞競合におけるがん化細胞の排除に関与することを示している。



左図は非平衡揺らぎの総強度。右図は複素弾性率のべき乗則 $G^*(\omega) = A(-i\omega)^{\frac{1}{2}}$ における係数A。Tet-offは非競合条件、Tet-onは細胞競合条件、Tet + DCAはDCA添加によるワールブルグ様代謝変化の阻害条件を示す。各点は個々の細胞の測定値、棒は対数平均、エラーバーは対数値の標準誤差を示す。細胞競合下では非平衡揺らぎが増大し、細胞質が流動化した。一方、非競合条件ではこれらの変化は見られず、DCA添加によっても揺らぎの増大と流動化が抑制された。

G-2 電場誘起液晶乱流における矩形セル内の平均流の渦構造

大分大学理工学部 [A], 九州大学理学研究院 [B], 九州工業大学情報工学研究院 [C] 平尾知樹[A], 小林史明 [B], 許宗君 [C], 折原宏 [A], 長屋智之 [A]

電場誘起液晶乱流の一種である動的散乱モード 2（DSM2）は，長年，等方的な乱流と考えられてきた。しかし，その乱流中に一方向に流れる平均流が形成され，見かけの粘性が負になる現象が報告された [1]。対流領域を 1.2 mm × 1.2 mm の正方形にすると，平均流が対流領域全体に渡る単一の渦を形成することも報告された [2]。

本研究では，対流領域の形状と平均流の渦構造との関係を調べるため，透明電極付きガラス基板を用いて長方形領域を設け，顕微鏡観察と粒子画像流速測定を行った。その結果，1 mm × 2.5 mm の長方形領域では，二つの渦からなる平均流が観測された（図 1）。また，この実験系に対応する 2 次元モデル [2] の数値計算でも複数の渦の形成を確認した（図 2）。これらの結果は，境界条件が DSM2 における平均流の渦構造の形成に重要な役割を果たすことを示唆する。

[1] H. Orihara et al., Phys. Rev. E **99**, 012701 (2019).
[2] Y. Sato et al., Phys. Rev. Lett. (in press).

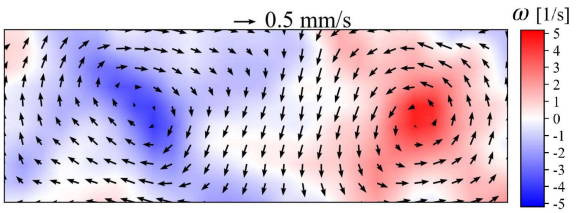


図 1　長方形領域（1 mm × 2.5 mm）で観測された平均流の速度場（矢印）と渦度（色）。

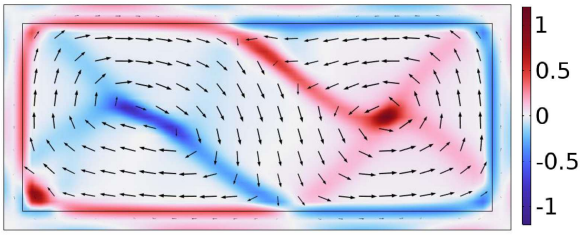


図 2　2 次元モデル[2]の数値計算で得られた長方形領域内の速度場（矢印）と渦度（色）。実線は領域の境界を示す。

G-3 pH 測定による荷電コロイド結晶の物理化学的特性：KOH 溶液添加時の効果

大分大学 [A] 玉井達也[A], 岩下拓哉 [A]

シリカコロイド粒子は、水中で表面のシラノール基が解離することで負に帯電することが知られている。帯電した粒子の周囲には電気二重層が形成され、KOH を添加した系ではカリウムイオンも粒子周囲のイオン分布に寄与する。帯電した粒子間には電気二重層を介した静電反発相互作用が働き、粒子の体積分率、表面電荷密度、イオン強度などの条件によってコロイド結晶が形成される。本研究では、大気平衡下にある荷電シリカコロイド分散液を研究対象とする。分散液の pH と電気伝導度を測定し、両者の KOH 添加濃度依存性を調べた。また、球対称ポアソン・ボルツマンセルモデルを用いて粒子周辺の電位とイオン濃度分布を計算し、表面電荷密度を変えた際の pH の計算値と実測値の比較から表面電荷密度の推定について検討する。

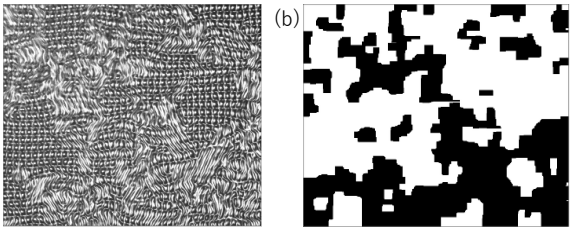
G-4 液晶電気対流における間欠性乱流の粗視化と相関関数

九大工 [A]　河野快音[A], 河野真也 [A], 合志憲一 [A], 石田謙司 [A], 日高芳樹 [A]

液晶電気対流は、ネマチック液晶に交流電圧を印加することで対流が形成される現象で、液晶のパターン形成だけでなく、乱流の輸送現象の研究対象としても用いられている。印加電圧を十分に上昇させると、秩序（グリッド）領域と無秩序（乱流）領域が明確な境界を隔てて共存する「間欠性乱流（図 (a)）」へと遷移する。本研究では、この間欠性乱流が示す乱流拡散の性質を明らかにすることを最終的な目的としている。その第一段階として、グリッド状態と乱流状態の共存がどのような時空構造をもつかを調べる。

そのために、グリッド領域と乱流領域の内部構造に立ち入らず、それぞれを単一の状態とみなす粗視化を行った。具体的には、撮影画像を小領域に分割し、各領域のパワースペクトルから周期性を評価することでグリッド領域と乱流領域に分割し、それぞれ 1 と 0 で表した 2 値化画像を作成した（図 (b)）。この 2 値化画像に対し、空間と時間の相関関数を求め、間欠性乱流における 2 状態の共存の統計的性質を評価する。

(a)　(b)



G-5 境界の形状によるクインケ粒子の集団運動制御

九大理 [A], 九大院理 [B]　渡邊優心[A], イジウォン [B], 朝枝響 [B], 小林史明 [B], 木村康之 [B]

近年、生物の群れや自己駆動する微粒子など、アクティブマターの集団運動に関する研究が活発に行われている。先行研究において、境界の形状によって粒子の運動が制御可能であることが示唆されている。我々は、境界形状による集団運動の制御をさらに進め、クインケ粒子系において、自発的に回転方向が選択された回転運動の実現を目指して研究を行った。

本研究では、クインケ粒子として PMMA 粒子（直径 20 mm）を用い、AOT －ヘキサデカン混合溶媒中に分散させた（体積分率 1 %）。UV レジンを用いて作製したラチェット型の流路に分散系を封入して直流電場を印加した。粒子画像流速測定法（PIV）を用いてラチェットの歯の部分（ポケット）における局所的な渦度と、主流（レーン）における全体の速度を測定し、両者の関係を調べた。実験では、流路の幅（比率）や歯の傾斜角を変化させて比較を行った。その結果、流路の幅が小さい（比率 0.75）場合には、電圧を上げて渦度を変化させても全体の速度増加が起こらなかった。一方、流路の幅が小さい（比率 0.8）場合には、ポケット部の渦度が増加すると全体の速度が上昇し、局所的な渦が効率的に主流の推進力に変換されていることが確認できた。以上より、全体の速度は印加電圧や局所的な渦の強さだけで決まるわけではなく、流路幅などの境界条件にも大きく依存することがわかった。

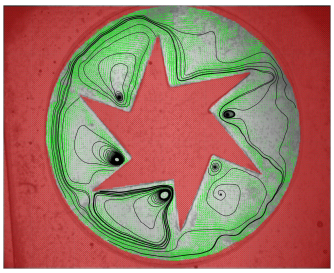


図1　比率0.75、$1.1 \times 10^7\ V/m$における粒子の流線

G-6 大腸菌抽出液の粘弾性測定とその時間変化

九大院理 [A] 熊丸一平 [A], 水野大介[A]

高濃度の生体高分子を含む細胞質はガラス・ゲル化にともない固化する一方、生細胞は代謝活動の下で流動性を保つ。本研究では HeLa 細胞抽出液を用い、粘弾性の時間変化と ATP 添加の影響を調べた。アクチン重合を阻害し、生細胞内に近い高分子濃度に調整した試料について、光ピンセットでプローブ粒子の揺らぎを測定した。揺らぎを熱的と仮定して粘弾性を求め、ATP 濃度も別途測定した。驚くべきことに、ATP を添加した抽出液は、作製直後には生細胞と定量的に類似したべき乗レオロジーを示した後、時間とともにさらに硬化した（図 1)。粘弾性と 4 kHz の揺らぎから求めた粘性率の増大幅は、測定した条件では ATP 未添加試料より大きかった。ATP の消費も確認された。一方、抽出液では ATP の有無によらず、生細胞で見られる大きな非熱揺らぎは観測されなかった。細胞に近い粘弾性を示す初期過程における時間変化は可逆であるために、試料封入時の攪拌で流動化した構造が再配置して安定化するエイジングの可能性がある。生細胞では、代謝由来の非熱揺らぎがエイジングに拮抗する若返りを引き起こし、流動性を維持する可能性がある。　　ATP 添加による硬化の増大については、ガラスの冷却速度依存性との類推を考える。ATP 消費に伴う分子スケールの駆動が構造再配置を助け、ATP の減少とともに駆動が弱まれば、緩やかな冷却のように、より安定な構造へ移行し得る。ただし、この微視的な駆動仮説は直接検出されておらず、閉鎖系での代謝産物蓄積の影響も分離されていない。物質交換系で ATP 濃度を維持した測定により、これらを検証する必要がある。

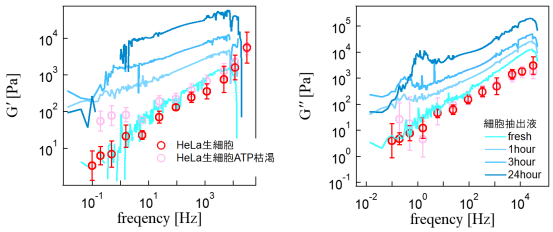


図1 ATP添加HeLa細胞抽出液（高分子濃度0.30 g/mL）の貯蔵弾性率（左）と損失弾性率（右）。実線は作製直後、1、3、24時間後の抽出液、赤丸は生細胞、桃色丸はATP枯渇細胞を示す。抽出液の値はプローブ粒子の揺らぎから評価した。

G-7 原形質流動に着想を得た空間的不均一散逸下の最小アクティブ輸送モデル：基本特性と課題

佐世保工業高等専門学校 [A] 三橋和彦[A]

粒子集団における接触連結性と力学的応答の関係は、ジャミングや接触パーコレーションの研究で議論されてきた [1]。また、粒子間接触をグラフとして表現し、力の分布や構造的特徴を解析する方法も発展している [2]。一方、継続的な局所駆動下で、接触構造の発達が巨視的な輸送応答にどのように反映されるかは、別途検討を要する問題である。

本研究では、植物細胞の原形質流動に着想を得て、局所駆動と粒子間接触による集団的な運動応答を調べる二次元最小モデルを構築した。モデルは斥力相互作用を持つ過減衰粒子からなり、下壁近傍で一時的に結合した粒子にのみ一定方向の駆動力を与える。また、壁近傍とその外側に異なる Drag 係数を設定し、空間的に不均一な散逸環境を導入した。粒子間に恒久的な結合はなく、接触状態は粒子運動に応じて変化する。

瞬間的な粒子間接触をグラフとして表現し、駆動粒子からの最短接触経路長を hop と定義した。充填率 ϕ=0.61 から 0.65 について、各 5 つの乱数系列で接触構造、接触力および粒子速度を評価した。

その結果、ϕ=0.62 から 0.63 への増加に伴い、駆動粒子から接触経路で到達可能な非結合粒子の割合は約 4.6 %から 35.5 %へ増加した。一方、非結合粒子の平均輸送速度には対応する増大が見られなかった。さらに、hop 別の接触力を大きさ、駆動方向成分の絶対値、符号付き成分に分解すると、接触構造が広く発達する条件でも、正味の力学的応答は駆動粒子近傍に集中していた。

これらの結果は、局所駆動を受ける粒子系において、接触構造の到達範囲と輸送応答が必ずしも対応しないことを示している。本講演では、両者の乖離を接触力の減衰と方向相殺の観点から議論する。

参考文献

[1] T. Shen, C. S. O'Hern and M. D. Shattuck, Phys. Rev. E 85, 011308 (2012).

[2] D. S. Bassett et al., Soft Matter 11, 2731 – 2744 (2015).

G-8 血清飢餓下における細胞のエネルギー代謝と細胞質の粘弾性・揺らぎダイナミクス

九大理学部 [A], 九大院理 [B] 奥野智美[A], 竹田芽衣 [B], 田尾優樹 [B], 趙松川 [B], 水野大介 [B]

培養細胞に対する血清飢餓処理は、細胞増殖やシグナル伝達を抑制するとともに、細胞のエネルギー代謝状態にも大きな変化をもたらす。一方で、このような細胞の代謝状態の変化が細胞質の力学特性や細胞内揺らぎにどのような影響を及ぼすかについては、十分に明らかになっていない。本研究では、血清飢餓状態における細胞質の力学特性の変化を明らかにすることを目的として、細胞のエネルギー代謝と細胞質の粘弾性・揺らぎダイナミクスを測定する。具体的には、異なる血清（FBS）濃度条件で培養した細胞について、細胞外フラックス解析装置（Seahorse）を用いて酸素消費速度（OCR、図 1）および細胞外酸性化速度（ECAR）を測定する。これらを指標としてミトコンドリア呼吸や解糖系による ATP 産生速度を評価する。また、光ピンセットを用いたマイクロレオロジー計測により、細胞質の粘弾性（図 2）および揺らぎダイナミクスを評価する。これらの測定を血清濃度や培養時間が異なる条件で実施し、その結果を比較することで、血清飢餓に伴うエネルギー代謝状態の変化と細胞質の力学特性との関係を検討する。

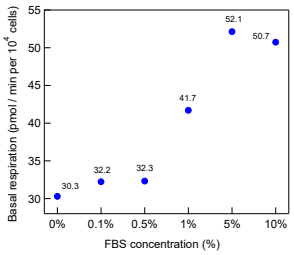


図1　FBS濃度に対するMDCK細胞の基礎呼吸速度（Basal respiration）の変化。MDCK細胞を各FBS濃度（0、0.1、0.5、1、5、10%）で24時間培養後、酸素消費速度（OCR）を測定した。Basal respirationは非ミトコンドリア由来のOCRを差し引いて算出し、各ウェルの細胞数で規格化し、10^4細胞当たりの値として示した。

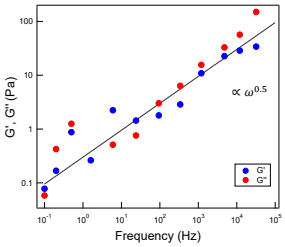


図2　FBS10%を含む培地で培養したMDCK細胞の細胞内粘弾性。光ピンセットを用いたマイクロレオロジー測定から得られた複素粘弾性率の実部（G'）と虚部（G''）の周波数依存性を示す。

G-9 クインケ粒子分散系のレオロジーと集団運動

九大理 [A], 九大院理 [B], 大分大理工 [C] 久保涼香[A], 増田廉 [B], 小林史明 [B], 長屋智之 [C], 木村康之 [B]

バクテリアや鳥の群れなど、自発的に運動するアクティブマターの集団運動に関する研究が近年活発に行われている。さらに集団運動に起因した系の巨視的な物性変化が注目されている。本研究では、直流電場により自己駆動するクインケ回転粒子（直径 50μm の球状 PMMA 粒子の AOT/ヘキサデカン分散系）を対象とし、粒子の集団運動がそのレオロジー特性に及ぼす影響を調べた。実験では、レオメーターを用いた粘度の測定と同時に高速カメラで撮影された動画の PIV 法による速度場解析を行った。図 1 に電場ゼロでの粘度で規格化した相対粘度の電場依存性を示す。高電場下では大きな負の粘性が観測された。また、図 2 には上部プレートを自由に回転できる状態で測定した自発せん断速度の電場依存性を示す。閾値電場以上で自発せん断速度が発生し、電場の増加に伴って増加することがわかった。さらに両者の比較から、負の粘性の発現は自発せん断流れの発生によることが明らかとなった。当日は速度場解析も加えて、クインケ回転粒子系のレオロジーと集団運動の定量的な関係を議論する。

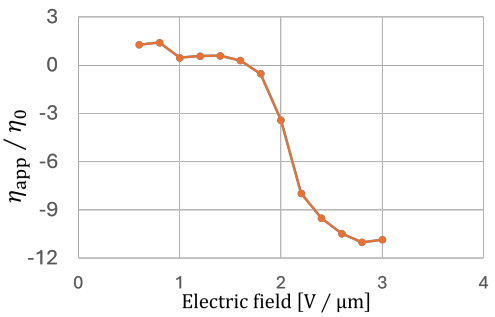


図 1 クインケ粒子分散系の粘度の電場依存性

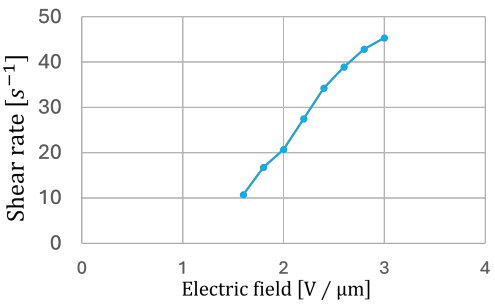
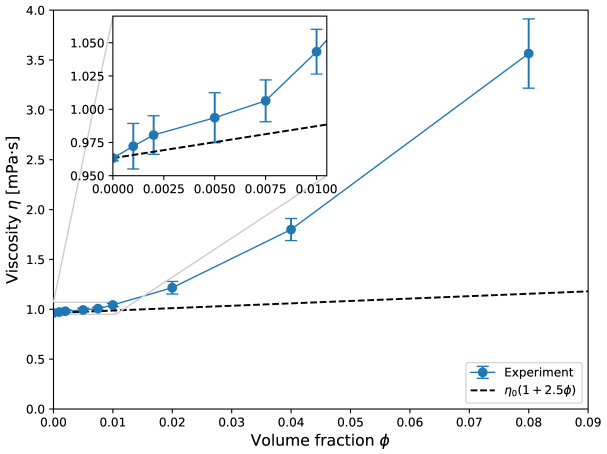


図 2　自発せん断速度の電場依存性

G-10　大気平衡下における無塩系荷電コロイド水溶液の粘度のセルモデル解析

大分大学 A　大谷紗菜A, 岩下拓哉 A

コロイド分散系において粒子間相互作用と構造変化の関係を明らかにすることは、ソフトマター物理学における重要な課題である。特に、荷電コロイド分散系では、電気二重層の形成や、表面電荷の変化が粒子間相互作用に影響し、系の構造変化を引き起こす。しかし、その影響については、まだ十分に明らかになっていない。　そこで、本研究では、大気平衡下における無塩系荷電コロイドシリカ水溶液の粘度の体積分率依存性について考察し、粒子間相互作用と流動特性の関係を明らかにすることを目的とする。本研究では、セルモデル解析により、大気中の CO2 との平衡を考慮し、理論計算から電気粘性効果を考慮した粘度を算出する。また、レオメーターを用いた粘度計測を行い、理論計算と実験の両面から無塩系荷電コロイド水溶液の粘度変化について報告する。



G-11　液晶電気対流パターンの観測画像に基づく乱流輸送

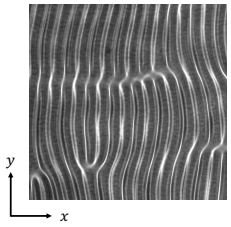
九大工 A　小森郁也A, 河野真也 A, 合志憲一 A, 石田謙司 A, 日高芳樹 A

ネマチック液晶に閾値電圧以上の電圧を印加すると、ロール状の対流構造が周期的に並んだ液晶電気対流が発生する。印加電圧をさらに大きくすると、対流ロールの揺らぎが生じる（図 1)。この状態は欠陥乱流と呼ばれ、局所的に秩序構造を保ちながら大局的には無秩序となる「弱い乱流」の典型例である。乱れが十分に強い「発達乱流」と比べて、弱い乱流による輸送現象の研究は十分ではない。

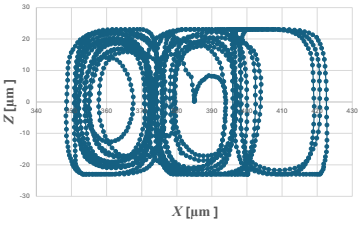
弱い乱流による物質拡散の研究では、混入した粒子を実験で追跡する方法と、数理モデルに基づく仮想粒子の運動を数値シミュレーションする方法が用いられてきた。前者は実際の流れを反映するが、条件を幅広く変えることが難しい。後者は条件を自由に変更できるが、実際の流れに含まれる不規則性を再現しにくい。

そこで本研究では、両手法の弱点を相互に補うことで、弱い乱流の輸送現象の解明を目指した。そのために、実験で得た欠陥乱流の画像から、ロールに垂直な方向の拡散を調べるための 2 次元速度場を構成した。この速度場を用いて仮想粒子の運動を数値シミュレーションし（図 2)、得られた粒子軌道から粗視化拡散係数や易動度の導出を試みた。

(図1)



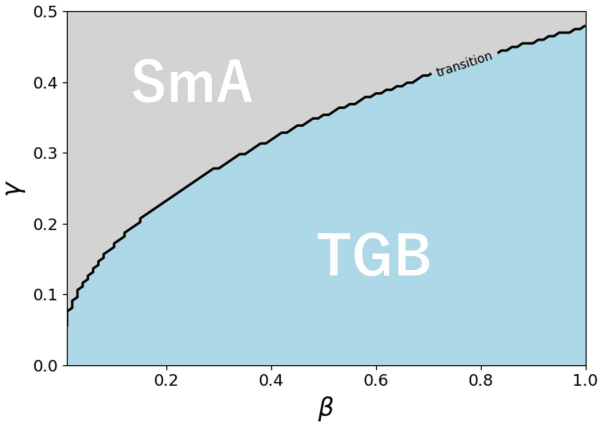
(図2)



G-12 強誘電性スメクチック A 液晶のキラル対称性の破れと構造転移

九州大学大学院理学府 [A], 九州大学大学院理学研究院 [B] 小田稜矢[A], 小田響己 [A], 福田順一 [B]

強誘電性液晶では，構成分子がキラリティを持たない場合でも，分子間の静電相互作用によって自発的にねじれ構造が形成され，キラル対称性が破れることがある．その中でも，強誘電性スメクチックA液晶では，層構造を保ちながら不連続にねじれるＴＧＢ構造が実験的に確認されているものの，その理論的理解は十分ではない．本研究では，強誘電性スメクチックA液晶を対象に，静電遮蔽効果を取り入れた静電相互作用を評価し，自由エネルギーを構築した．これを解析することで，遮蔽の強さや強誘電性の強さが液晶構造に与える影響を解析した．その結果，静電遮蔽の強さを変えるとＴＧＢ構造とねじれのないスメクチックA構造の間で転移が起こり，強誘電性の強さによって転移点も変化することが分かった(図参照)．特に，強誘電性が強い (β が大きい) ほど，遮蔽が比較的強い (γ が大きい) 場合でもＴＧＢ構造が安定になる．



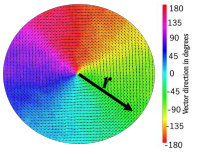
G-13 液晶乱流の幾何学的制御

九大理 [A], 九大院理 [B], 大分大理工 [C] 清原悠翔[A], 宮内良門 [B], 小林史明 [B], 長屋智之 [C], 木村康之 [B]

誘電異方性が負のネマチック液晶にしきい値以上の電圧を印加すると電気対流が発生し、さまざまなパターンが電圧とともに現れる。特に、高電圧下では乱流状態 (DSM 相) が出現することが知られている。しかし、近年、等方的な乱流状態である DSM2 相において、自発流れが発生することが報告されている。本研究では、自発流れが発現する DSM2 相をアクティブ流体とみなし、これをさまざまな境界形状をもったセルに閉じ込め、流れ場の変化を調べた。

ネマチック液晶として安定して自発流れが観測されている 4'-エトキシベンジリデン-4-ブチルアニリン（EBBA）を用いた。ITO ガラスを用いて作成した平行平板セルに液晶を封入し、交流電場を印加した。顕微鏡を用いて動画を撮影し、粒子画像流速測定法（PIV）を用いて流れ場の定量的評価を行った。

厚さ 100μm のセル中での直径 3 mm の液晶液滴内部の流れ場とその向きを図 1 に示す。液滴の中心を中心とする渦状の流れ場が形成されていることがわかった。図 2 に速度場の位置依存性を示す。液滴の中心を除き、一定の速度での流れが発生していることがわかる。当日は ITO ガラス上に UV 硬化樹脂を用いて形成したさまざまな形状の境界壁の持つセル中での結果も報告する。



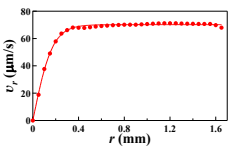


図 1　3 mmの液晶液滴中の流れ場の例　図 2　3 mmの液晶液滴中の流速の位置依存性