

## 熱流が駆動するカイラル液晶滴の一方方向剛体回転

### [1] 要旨：

カイラルな液晶の滴に温度勾配を与えると、熱の流れる方向を軸として液晶分子が一方方向に定速で回転する。古くから知られる交差相関の一つだが、近年この分子回転をめぐる、2つの解釈が対立している。それは、等方液体相と共存する滴に熱流が流れたとき、滴内の液晶分子は重心を変えずに向きを回すのか、それとも液晶滴全体が剛体として回転するのか、というもので、両者は顕微鏡観察や蛍光回復法では区別できない。本論文は、試料に分散させたトレーサー粒子の追跡というシンプルな手法で、熱流下のカイラル液晶滴が剛体回転することを明示した。さらに、回転する液晶滴の周囲の等方相には、通常と異なる流動場が生じている可能性が示された。

### [2] 本文

線形な流れによって物体が一方方向回転する現象は、風車から分子モーターまで様々なスケールで見られる。同様の回転は鏡像対称性を持たないカイラルな液晶にも見られ、中でも、熱流で駆動される液晶分子の集団回転が古くから知られている。液晶は、多数の分子が向きだけをそろえて集まった状態なので、固体や1分子のローターと違い、分子集団としての回転の仕方が一通りではない。具体的には、等方液体中にあるカイラル液晶の滴に熱を流した場合、①各液晶分子は重心位置を変えずに方向だけが回る（配向回転）、②分子相互の位置と向きを保って滴全体が回る（剛体回転）、③分子の重心位置と相互配向の両方が回る、という3通りの回転運動が起きうる。どの回転になるかは、与えられた条件（境界条件・初期状態・液晶の粘弾性等）の下で、散逸が最も小さくなるように決まる。逆にこれらの条件を外から変えることで、回転の仕方を制御することも可能と考えられる。熱流によるカイラル液晶の回転は、発見から100年たった今もミクロなメカニズムがわかっていない。その解明にも、また熱-力変換材料としての応用にも、熱流下の液晶滴の分子回転挙動を特定することは必要不可欠である。しかし、前述の3つの回転を見分けることは簡単ではない。偏光顕微鏡観察では原理的に不可能で、これを補う方法として、液晶中に混ぜた蛍光分子の拡散を追跡する流動場測定が過去に行われたが、蛍光分子の拡散が滴の熱駆動回転よりはるかに速いため解析が難しく、確信的な証拠が得られなかった。結果として、液晶の熱駆動回転をめぐる解釈の対立が数年にわたって続いている。

最近、この議論に決着をつける実験が、早稲田大学先進理工学研究科物理学及応用物理学専攻の研究グループによって報告された。著者らは、液晶試料中に直径1ミクロン程度の微粒子を分散させ（図1(a)）、粒子の位置を追跡することにより、熱流下の液晶滴の剛体回転を直接捉えることに成功した。これを示す光学顕微鏡像を図1(b)に示す。滴の縞状組織は、分子の配向が白矢印で示されるらせん軸に沿って一様にねじれていること（図1(a)参照）を表している。図1(b)の最初の画像で滴の右下に付着している青いトレーサー粒子に注目すると、らせん軸が時計回りに回転するのに合わせ、粒子は遅れることなく同じ方向に回転している。図1(c)は、らせん軸とトレーサー粒子の回転角度を時間に対してプロットしたもので、両者はぴったりと一致した。らせん軸の回転は分子配向だけが回っても観察されうるが、滴に付着した粒子がらせん軸と同じ角速度で回転したことは、滴の剛体回転でしか説明できない。数年来の議論に決着をつけたこの結果は、日本物理学会が発行する英文誌（JPSJ）の2019年6月号に掲載された。

トレーサー粒子による流動場の可視化は古典的な手法であるが、これまで、等方相と共存する液

晶滴に微粒子を付着させることができなかった。液晶にとって不純物となるトレーサー粒子は、通常、等方相中に分散するか、ガラス基板に吸着するか、どちらかを好むためである。今回の実験では、液晶—等方相界面に特異的に吸着する微粒子を選択した点に工夫がある。さらにこの微粒子は、等方相中にもわずかながら分散するので、その動きから等方相の速度場がわかる。論文では滴周囲の流動場も調べられているが、意外なことに、等方相に浮遊する微粒子は、液晶滴の近傍でも滴の表面に沿った回転を示さない。この系のレイノルズ数は極めて小さいので、等方相が一様な粘性流体と見なせるならば、剛体回転する滴の周囲に回転流が生じるはずである。この流れが検出限界以下に小さい理由はわかっていないが、共存相界面では教科書的な固体—液体界面の境界条件が成り立たない可能性もある。これに答えるには、より詳細な実験と解析が必要である。新たな課題が提示されたことも含め、本論文の結果は、熱流が駆動するカイラル液晶回転の機構解明とアクティブマターとしての応用への大きな一歩であり、今後の展開が待たれる。

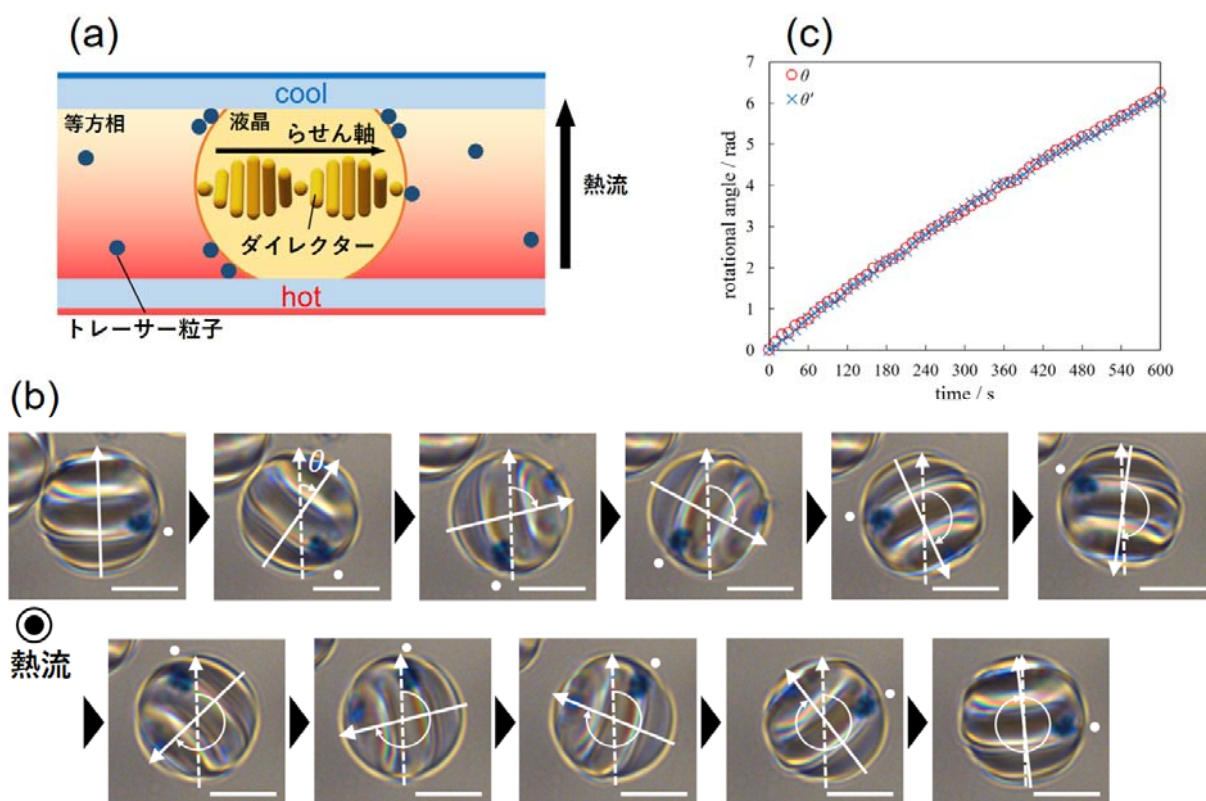


図 1. (a) 温度勾配下におかれたカイラル液晶滴の模式図。滴は等方相と共存状態にある。(b) 温度勾配  $4\text{mK}/\mu\text{m}$  下に置かれた液晶滴と粒子の顕微鏡像。白い矢印はらせん軸、実線は  $10$  ミクロンを表す。各像は  $1$  分毎に撮影。(c) らせん軸の回転角度  $\theta$  と滴に付着した粒子の回転角度  $\theta'$  の時間変化。

### 原論文

Direct Observation of Rigid-Body Rotation of Cholesteric Droplets Subjected to a Temperature Gradient  
 Katsu Nishiyama, Shinji Bono, Yuji Maruyama, and Yuka Tabe: *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 063601 (2019).

<情報提供 多辺由佳（早稲田大学先進理工学研究科 教授）>