

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14433

研究課題名（和文）キラルな液晶滴の非平衡ダイナミクスにおける競合する散逸構造

研究課題名（英文）Dissipative structures in the non-equilibrium dynamics of chiral liquid crystal droplets

研究代表者

坊野 慎治（Bono, Shinji）

立命館大学・総合科学技術研究機構・准教授

研究者番号：60778356

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：小さな熱流下で等方液体相中に分散したキラルな液晶滴は剛体回転し、印加する熱流量を増やすと構造の歪みを伴う配向回転が生じることが知られている。これらの2つの定常な運動モードは、注入されたエネルギーに対して散逸を最小化するように決定されるはずである。本研究では、キラルな液晶滴の非平衡定常ダイナミクスにおいて、競合する2種類の散逸機構を選択する要因を解明した。また得られた研究成果に基づき、Microelectromechanical systems分野において微細構造中の熱的及び電気的特性を可視化するための原理を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

“液晶滴の熱駆動回転が剛体回転なのか配向回転なのか？”この疑問は長年議論されているにもかかわらず、決着がついていなかった。この理由として、等方相に生じる流動場が小さく粒子などを用いた流動場検出が困難である点と、滴界面エネルギーが低く、この界面に吸着するトレーサーが乏しい点とが挙げられる。本研究ではこれらの問題点を解決し剛体回転を捉えることに成功した。本研究で得られる知見は、ソフトマターにおける非平衡定常ダイナミクスを理解するためだけでなく、液晶の新しいセンサ応用のためにも重要である。実際に本研究では液晶滴を用いると非常に高い空間分解能で温度勾配や電場分布を可視化できることを示した。

研究成果の概要（英文）：Chiral liquid crystal droplets (LCDs) dispersing in their isotropic phase under a weak heat flux show rigid body rotation. On the other hand, when we increase heat flux, chiral LCDs exhibit director rotation with director distortion. These two steady-state dynamics must be determined so that dissipation is minimized for injected energy. In this study, I investigated the factors that switch competing dissipation mechanisms in nonequilibrium dynamics of chiral LCDs. Based on the research findings we proposed a visualization mechanism of thermal and electric properties of microstructures in microelectromechanical systems.

研究分野：ソフトマターの物理

キーワード：液晶 ソフトマター キラリティー MEMS

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マクロから分子スケールにわたるキラルな構造体を一様な流れ下に置くと一方向に回転することが知られている。これらの現象は、鏡像対称性の破れた系に普遍的に見られる現象で、例えば風車やモーターたんぱく質、分子モーターなどが挙げられる。一様流として注入されたエネルギーはこれらのキラルな構造体が回転する際に散逸され、定常なダイナミクスが発現する。特にソフトマター物理学や生物物理学が扱う系は大きな内部自由度を有するため複数の散逸機構を内包する。そのため、例えば鞭毛やアメーバなどは内部におけるヘテロなエネルギー散逸と、外部における散逸の結果、様々な運動モードが生じる。そしてこの運動モードは、条件(エネルギー注入量等)下で散逸が最小になるように決定されるはずである。しかし現実には多数の要素を含む系で特定の散逸機構の影響を独立に評価することは困難である。

本研究では、散逸が競合する最も単純な系としてキラルな液晶が一様熱流下で示す回転現象に注目した。一定周期(0.1~10 μm)で分子配向がねじれたコレステリック(Ch)液晶は鏡像対称性の破れた構造で、一様熱流れ下で特異な非平衡ダイナミクスを示す(図1(a))。例えば等方(Iso)相中に分散した半球又は円柱形状のCh液晶滴に熱流を印加すると、運動モードの転移を含む定常ダイナミクスが生じる(図1(b))：熱流(注入されるエネルギー)が小さい(~1mK/ μm)と滴内の相対的な分子配向を保ったまま剛体回転する。一方で注入量大きい(~10mK/ μm)場合には、配向の回転が生じ、それに伴い配向歪みの蓄積 \leftrightarrow 解放を繰り返す(図2)。この系において、Ch液晶滴に注入されたエネルギーは、剛体回転や配向回転に伴い散逸され、その運動モードは2種類の競合する散逸を最小化するように決定される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、熱流としてキラル液晶に注入したエネルギーが剛体回転と配向回転によってそれぞれの程度散逸されるかを定量的に明らかにし、散逸機構を選択する因子を解明することである。そのために以下の2点を研究目的とした。

- (1) キラル液晶の非平衡ダイナミクスについて散逸を定量評価する手法の確立
- (2) キラル液晶滴の回転を利用した熱特性の可視化原理

3. 研究の方法

(1) Ch滴の剛体回転を可視化するために、非常に界面エネルギーが低いCh液晶滴界面に付着するコロイドを開発した。また広い熱流領域を印加するために、熱流印加装置を構築した。付着したコロイドの回転速度と、Ch液晶滴の配向パターンの変化速度を比較することで、剛体回転と配向回転として散逸される割合を見積もった(図3)。

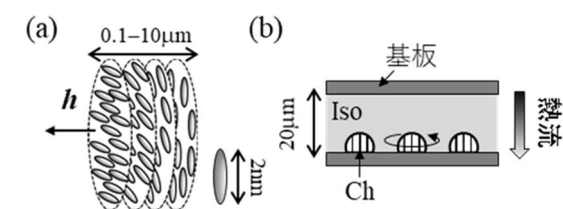


図1 (a) Ch液晶及び(b) Iso相中に分散したCh滴の模式図。

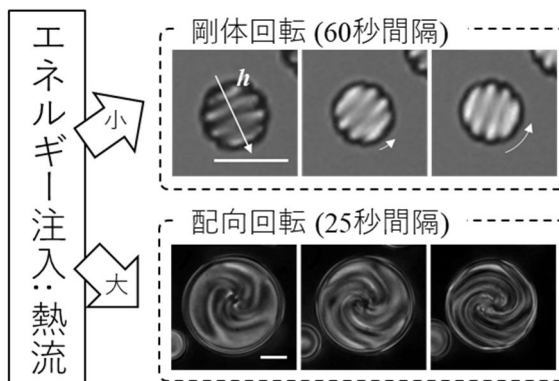


図2 Ch滴の剛体回転と配向歪みを伴う回転挙動。スケールバーは20 μm を示す。

熱流(注入されるエネルギー)が小さい(~1mK/ μm)と滴内の相対的な分子配向を保ったまま剛体回転する。一方で注入量大きい(~10mK/ μm)場合には、配向の回転が生じ、それに伴い配向歪みの蓄積 \leftrightarrow 解放を繰り返す(図2)。この系において、Ch液晶滴に注入されたエネルギーは、剛体回転や配向回転に伴い散逸され、その運動モードは2種類の競合する散逸を最小化するように決定される。

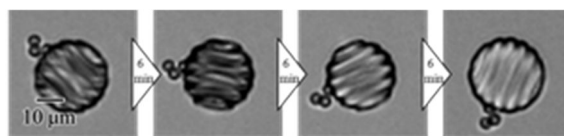


図3 Ch滴に付着したコロイドと配向パターンの回転挙動。

(2) Ch液晶滴の回転挙動を利用して、Microelectromechanical systems(MEMS)における微小な熱流を検出した(図4)。Ch液晶滴は、滴サイズ程度の高い空間分解能を有すると期待される。そこでこの滴をMEMSデバイス上に一様に分散させて、デバイスを駆動しながら、Ch液晶滴の回転挙動を調べた。特に、作製したモデルデバイス上にCh液晶滴を分散させて、欠陥由来の微小な熱流検出を行った。

4. 研究成果

(1) 液滴界面に付着したコロイドの軌跡を調べ、Ch 液晶滴の剛体速度を調べた。また配向変化に由来する、透過光強度の時間変化を調べた。これらの結果を比較することで、剛体回転と配向回転の割合を導出した。その結果液晶滴の形状が半球形状に近く、熱流が小さい場合には、剛体回転が支配的であることが明らかになった。

本研究では、この現象を理解するためにアンカリングと配向弾性に注目してモデルを構築した。その結果、滴内部の液晶配向に働く規制力と配向弾性の比により定義される外挿長が滴の直径よりも小さい場合、剛体回転としての散逸が支配的となり、逆に大きい場合、配向回転が支配的な散逸機構となることを明らかにした。

(2) MEMS デバイスに電流を印加すると、その一部が熱として散逸される。印加電流量に対し、Ch 液晶滴の角運動量の関係調べると、線形関係が成り立つことが分かった。また、デバイスの一部に欠陥に見立てた構造を導入すると、欠陥構造付近の Ch 滴のみ回転挙動を示し、その角運動量は欠陥から離れるほど小さくなる。本研究では、これらの関係を定量的に求め、熱流を逆に見積もることに成功した。この手法を用いると、局所的な熱流を数 $10\mu\text{m}$ 程度の高い空間分解能で、また $0.1\text{ mK}/\mu\text{m}$ 程度の高い検出精度で、MEMS デバイス内部の熱流を可視化できることを示した(図 5)。

微小熱流の可視化

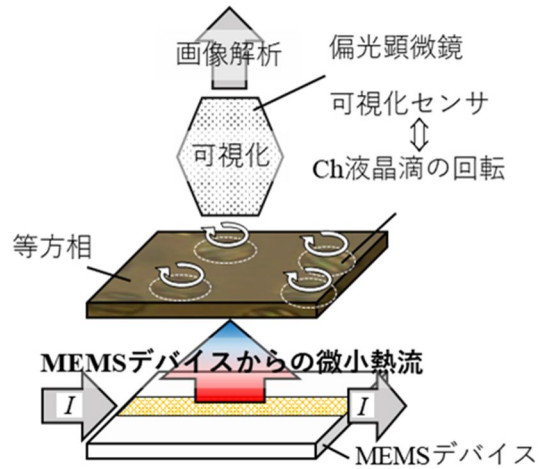


図 4 Ch 液晶滴の回転を利用した MEMS デバイスの熱流可視化。

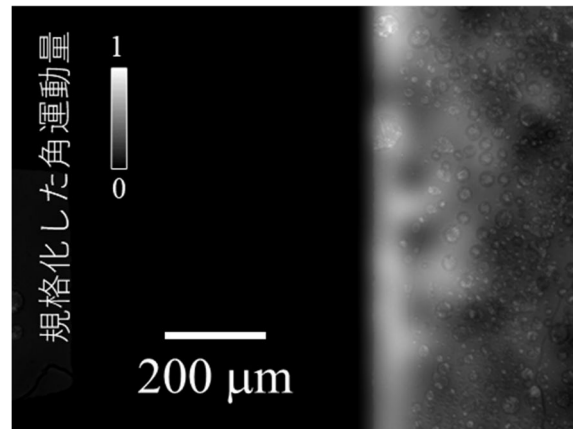


図 5 Ch 液晶滴の角運動量を利用して、可視化した MEMS デバイスの熱流分布。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Bono Shinji, Konishi Satoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Threshold magnetic field as a universal criterion for the selective transport of magnetized particles in microdroplets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 9428
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-36516-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Bono Shinji, Sakai Kota, Konishi Satoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Enhancement of solute diffusion in microdroplets using microrotors under rotational magnetic field	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 111699
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-38299-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Miyata Yoshinori, Bono Shinji, Konishi Satoshi	4. 巻 92
2. 論文標題 Volume Control of Droplets in Vertical Contact-Separation Process Using Radius Difference of Solid-Liquid Interface on Substrate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104802
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.92.104802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bono Shinji, Konishi Satoshi	4. 巻 19
2. 論文標題 Vertical Contact Separation Process of Liquid Crystal Micro Droplets for Chirality Sensing Mechanism	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 773-777
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23961	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bono Shinji, Nakai Ryotaro, Konishi Satoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Simultaneous detection of the shuttling motion of liquid metal droplets in channels under alternating pressure and capacitive sensor signals	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Microsystems & Nanoengineering	6. 最初と最後の頁 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41378-024-00652-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shunsuke Takano, Shinji Bono, and Yuka Tabe	4. 巻 92
2. 論文標題 Heat-flux-driven Rotation of Cholesteric Droplets Dispersed in Glycerol	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 24601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.024601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinji Bono and Satoshi Konishi	4. 巻 12
2. 論文標題 Temperature gradient sensing mechanism using liquid crystal droplets with 0.1-mK-level detection accuracy and high spatial resolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-18008-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinji Bono, Yoshinori Miyata, and Satoshi Konishi	4. 巻 62
2. 論文標題 Volume difference in microdroplets in vertical contact control under electrowetting-induced asymmetric boundary condition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 17003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acb51e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinji Bono and Satoshi Konishi	4. 巻 13
2. 論文標題 Rotation and transportation of liquid crystal droplets for visualizing electric properties of microstructured electrodes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-31026-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Bono Shinji, Takahashi Riku, Konishi Satoshi	4. 巻 16
2. 論文標題 Quantitative Analysis of the Volume Difference of Microdroplets in Vertical Contact Control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 54044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.16.054044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishiyama Katsu, Bono Shinji, Tabe Yuka	4. 巻 17
2. 論文標題 Steady rigid-body rotation of cholesteric droplets and their dumbbell-shaped aggregates driven by heat flux along the helical axes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 10818 ~ 10828
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1SM01524A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bono Shinji, Konishi Satoshi	4. 巻 35
2. 論文標題 Liquid Crystal Droplets as a Visualization Sensor of Heat Flux from Microfabricated Metal Structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS)	6. 最初と最後の頁 184-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MEMS51670.2022.9699521	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimizu Ayano, Kakehi Yugo, Bono Shinji, Konishi Satoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Liquid metal droplet shuttling in a microchannel toward a single line multiplexer with multiple sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-08611-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinji Bono, Yuji Maruyama, Katsu Nishiyama and Yuka Tabe	4. 巻 124
2. 論文標題 Heat-Driven Rigid-Body Rotation of a Mixture of Cholesteric Liquid Crystal Droplets and Colloids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. B	6. 最初と最後の頁 6170-6174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c04186	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Satoshi Konishi, Yugo Kakehi, Fuminari Mori, and Shinji Bono	4. 巻 11
2. 論文標題 Smooth transportation of liquid metal droplets in a microchannel as detected by a serially arranged capacitive device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 7048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-86394-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Shinji Bono, Satoshi Konishi
2. 発表標題 Chirality sensing mechanism using vertical contact control of liquid crystal micro-droplets
3. 学会等名 The 22nd international conference on solid-state sensors, actuators and microsystems (TRANSDUCERS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坊野 慎治、小西 聡
2. 発表標題 液晶滴の回転・並進運動を利用した微細電極内の電場分布の可視化
3. 学会等名 日本液晶学会討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上曜、鹿田建普、坊野慎治、森武洋
2. 発表標題 正弦波交流電圧に対する液晶の動的な応答特性
3. 学会等名 日本液晶学会討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坊野慎治、小西聡
2. 発表標題 微小液滴アレイの空間融合分離を利用した試薬自動濃度制御
3. 学会等名 「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中井涼太郎、坊野慎治、小西聡
2. 発表標題 複数の液体金属セグメントの流路内同時位置制御を利用した静電容量スイッチング
3. 学会等名 「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坊野慎治、酒井康太、小西聡
2. 発表標題 回転磁場下に置かれた微小回転子の液滴内溶質拡散に対する促進効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 坊野慎治
2. 発表標題 微細電極上に置かれた液晶滴の回転・並進運動
3. 学会等名 京都若手ソフトマター研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shinji Bono, and Satoshi Konishi
2. 発表標題 Liquid Crystal-Particle Imaging Electrometry for Micro Electro Mechanical Systems
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2022 (APCOT-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坊野慎治、小西聡
2. 発表標題 キラル液晶滴を用いた高精度熱流センサ
3. 学会等名 2022年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinji Bono
2. 発表標題 Three-dimensional manipulation of microdroplets for high-throughput biochemical assay
3. 学会等名 15th Joint Symposium of Ritsumeikan University and The University of British Columbia
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坊野慎治、小西聡
2. 発表標題 空間分離過程における微小液滴体積差の定量予測
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinji Bono, Satoshi Konishi
2. 発表標題 LIQUID CRYSTAL DROPLETS AS A VISUALIZATION SENSOR OF HEAT FLUX FROM MICROFABRICATED METAL STRUCTURES
3. 学会等名 The 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉寄あすか、坊野慎治、小西聡
2. 発表標題 EWODデバイスにおいて液滴・電極相対位置が接触角に与える影響
3. 学会等名 第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坊野慎治
2. 発表標題 コレステリックダブルツイストシリンダーの熱駆動剛体回転
3. 学会等名 日本液晶学会ソフトマターフォーラム講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

立命館大学 研究者学術情報データベース https://research-db.ritsumei.ac.jp/rithp/k03/resid/S001783 立命館大学 小西研究室 http://www.ritsumei.ac.jp/se/~konishi/mems/home.htm
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------