



東京大学実験統計力学研究室（竹内研究室） —研究室紹介から見る液晶科学の拡がり—

竹内 一将

1. はじめに

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻にある竹内一将研究室は、「実験統計力学研究室」を銘打っている。そこに液晶の文字はない。それなのに、日本液晶学会誌で研究室紹介の機会をいただくことになった。これは一体どういうことだろうか？

研究室で取り組んでいるテーマを見てみよう。図1は、研究室ウェブサイトに掲載されている研究紹介記事一覧を、本稿用に編集したものである。研究室の目標として、「ソフトマター・生物系を駆使して、新しい非平衡統計力学を実験的に探求・理解していこう！」ということ掲げている。やはり液晶の文字はない。個別の研究テーマを見てみると、材料として液晶を使った研究が1/3程度あるが、バクテリア、非平衡相転移、アクティブマターといった、液晶との関係が自明でないキーワードも目立つ。そこで本稿では、研究室紹介にかこつけて、これらキーワードから垣間見られる液晶科学の拡がりをご覧いただくこととしたい。

2. 非平衡相転移と液晶

液晶はソフトマターの一つに分類され、様々な非線形・非平衡現象の舞台となる。例えば、非線形非平衡系の代表例とも言える対流現象は、液晶の場合電圧印可によって引き起こすことができ、電気対流¹⁾と呼ばれている。電気対流は、印可電圧の振幅や周波数によって様々な対流パターンが現れるため、非平衡特有のパターン形成の例として熱心に研究された歴史がある。我々は、この系が、非平衡統計力学の実験研究、特に非平衡臨界現象など、理論的に普遍性が期待されているスケーリング則を開拓するのに非常に魅力的な以下の特徴をもつことに惹かれて、様々な研究を展開している²⁾。

1. 相転移・臨界現象は、理論的には、無限自由度の系（つまり無限に大きな系）で定義できる。熱平衡系では、通常、原子分子やスピンなどが微視的自由度となり、実際の自由度数はAvogadro数程度である。一方、非平衡系では多くの場合、散逸構造と呼ばれる中間スケールの構造（例えば対流のロール構造）が生じてしまい、それが1自由度となる。すると、自由度数は高々、実

験系のアスペクト比（対流容器の縦横比）程度であり、対流系では通常、高々 10^2 程度で、極めて小さい。その点、液晶電気対流は電場で効率的に対流駆動できるため、アスペクト比は容易に 10^3 を超えられる。二次元なら自由度数は $(10^3)^2=10^6$ となり、十分大きな系で臨界現象を調べられる。

2. 我々が主に使うのは、動的散乱モード（dynamic scattering mode, DSM）と呼ばれる、印可電圧が比較的高い場合に見られる乱流状態である。DSMは、正確には時空カオス状態であり、ゆらぎの相関は短距離・短時間で減衰する。つまり、実効的に短距離相互作用系であり、系の詳細によらない、普遍的なスケーリング則が出現しやすい。

3. 液晶系は、表面処理により配向条件を変えたり、試料のドーピングにより異なる液晶相にしたりできる。これは、実験系がもつ対称性を変え、制御できることを意味する。臨界現象などの普遍クラスは、主に対称性により分類されるため、それを様々に変えられるのは液晶系の特筆すべき強みである。

これらの特徴を活かして、どのようなことが調べられたかを紹介しよう。液晶乱流DSMにはDSM1とDSM2の二種類があり、DSM2ではトポロジカル欠陥（disclination）が高密度で存在する。竹内が学生だった頃の研究であるが、我々は、DSM1–DSM2間の非平衡相転移が、有向浸透現象（directed percolation, DP）の普遍的な臨界現象を示すことを発見した³⁻⁵⁾（図1(d)）。理論的には、DPは統計力学的な基礎が確立しているうえ、感染症モデルや触媒反応モデルなど、様々なモデルが同じ臨界現象を示すことから、実際の自然現象でも出現が期待されていた。それが初めて確認されたのが液晶乱流のDSM1–DSM2転移となった。その後、DP転移は、単純流体の層流乱流転移^{6,7)}や液滴のLeidenfrost効果⁸⁾でも観測され、さらなる拡がりを見せている。

DP普遍クラスは、ひとたび実現したら二度と元に戻れない状態、いわゆる「吸収状態」が関わる相転移に普遍的な臨界現象として理解されている⁵⁾。DSM1–DSM2転移は、トポロジカル欠陥からなるDSM2乱流が、欠陥のないDSM1乱流に変化する転移である。つまり、欠陥が消滅す



図1 竹内研究室の研究テーマ一覧 (抜粋). 各テーマの詳細はウェブサイト <https://labjp.kaztake.org/> から見る事ができる. 材料による分類は赤, 内容面での分類はその他の色で示した. 竹内研究室ウェブサイト (2024)⁶ を改変して転載.

ることでDSM2からDSM1に転移するのだが, 逆に欠陥を生成するには高いエネルギー障壁を越える必要があるため, そのような条件が整わない限りDSM1からDSM2への転移は起こらない. すなわち, DSM1は吸収状態であり, そのおかげでDP転移が現れたのだ.

DPは乱流中の欠陥消滅が本質だが, 印可電圧が高い場合は, 欠陥は逆に増殖する. このとき, 欠陥乱流DSM2はDSM1の領域を侵食し, 広がっていく (図1(c), 黒い領域がDSM2で, 時間と共に半径が増大していく). これは成長過程と呼ばれ, 紙などの燃え拡がりや, 増殖する細胞の塊など, 様々な自然現象に例がある. これらはミクロには全く違う現象だが, 成長領域の境界線 (液晶ならDSM1-DSM2界面) は, 大小様々なゆらぎが混在した, よく似た複雑な形状を作る. これは偶然ではなく, 理論的にはKardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスの名で知られる普遍的なスケールリング則^{2,9,10}が期待される. 実は, 今世紀に入り, KPZクラスは統計力学・数理論物理学の特別な存在となった. 非平衡, 非線形, 大自由度の確率的な現象であるにもかかわらず, 一次元では厳密解が発見され, 詳細な統計的性質が明らかにされたからだ. ランダム行列理論や量子可積分系など, 数学と物理学の諸分野との繋がりが生まれたことも特筆すべきである. 我々は, 液晶のDSM2界面成長を使い, 厳密解が予言する様々な統計法則を検証しただけなく, 未知の

数理的性質を実験で見だし, 後から数学の定理が作られるなど, 面白い展開を生むことができた^{9,11-16}. 最近では, 大偏差の実験計測も狙い, 研究を進めている.

対称性を活かした研究の例も紹介しよう. 液晶ディスプレイでも使われるツイスト配向条件は, 左巻き・右巻きの捻れが双安定で実現するため, 磁性体のIsingモデルと同じ対称性をもつ. 我々は, DSM2乱流により配向が激しく乱れた状態を初期条件として, 電圧除去により瞬間的に緩和過程を始めることで, Ising秩序化過程に関する様々な動的スケールリング則を高精度に検証することに成功した^{2,17} (図1(b)). もちろん, 対称性の種類やターゲットとする現象はこれに限らない. 今後も, 液晶を用いた非平衡スケールリング則の開拓は様々な方に推し進めていけると考えている.

3. アクティブマターと液晶

話題を大きく変えよう. 近年, 非平衡統計力学と生命科学, ソフトマターを股に掛け, アクティブマター物理学¹⁸が目覚ましく発展している. 通常物質と比べ, 多くの生き物や細胞がもつ特徴の一つに, 自分自身で動き回ったり, 成長や増殖をしたりすることが挙げられよう. そこで, 通常原子分子の代わりに, 自発的に運動する粒子 (自己駆動粒子) を考え, それらが集まって相互作用し

アクティブマターの諸物質相

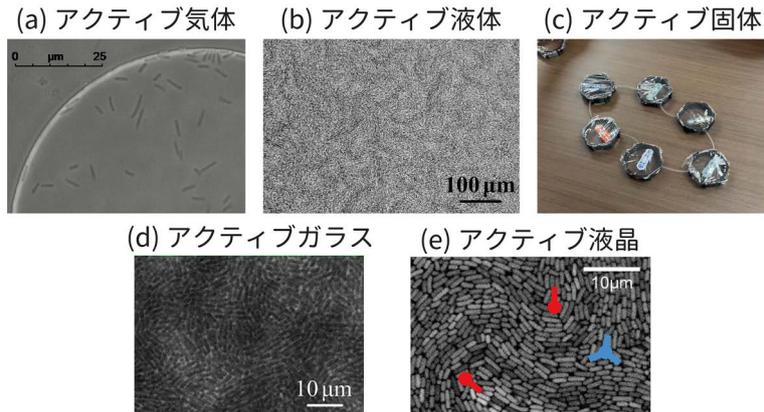


図2 アクティブマターの諸物質相。(a)大腸菌のアクティブ気体状態¹⁹⁾。(b)枯草菌濃縮懸濁液のアクティブ液体(乱流)状態²⁰⁾。(c)Hexbugを用いて作られたアクティブ固体。Baconnierらの研究²¹⁾を参考に、東京大学物理学科の学生有志団体Physics Lab. 2023が大学祭で実演したもの。(d)大腸菌のアクティブガラス状態²²⁾。(e)大腸菌コロニーにおけるアクティブ液晶状態²³⁾。竹内研究室ウェブサイト(2024)⁶⁾を改変して転載。(b)は西口大貴氏提供。

たときに、集団としてどのような性質が生じるかを問う。いわば、自己駆動粒子という「非平衡な分子」からなる新奇物質を考えて、そこにどのような物質相があるか、支配原理や支配方程式は何か、どのような新奇物性が生じるかといった根元的問題に取り組むのが、アクティブマター物理学である。

竹内研究室では、バクテリアを中心に、ほかの生物や遊泳コロイド粒子なども使いつつ、アクティブマター研究を多面的に展開している。特に、アクティブマターが示す諸物質相(図2)に魅せられ、通常物質の性質との違いや共通点、支配原理の理解などを目指している。例えば、観察領域にバクテリアが疎らにしかいない場合は、菌一匹一匹がバラバラな方向に遊泳するため、気体的な状態と言えよう(図2(a))。しかし、菌液を濃縮し、高密度のバクテリア集団が活発に泳ぎ回る状況を用意すると、バクテリアたちは集団遊泳し、アクティブな液体状態となる(図2(b))。バクテリア懸濁液は自発的に乱流化する興味深い特徴があるが、柱などの構造物を設けたりウェルに閉じ込めたりすることで、秩序だった流れに変えることもできる^{18,20)}(図1(j, m))。また、バクテリアは、栄養条件下では成長し、分裂するため、個体数がどんどん増えていく。そのため、一定体積の観察領域中では、やがて混雑状態となり、ガラスのように流動が停止する²²⁾(図1(k), 図2(d))。我々は、アクティブガラス転移が熱的ガラスにない特徴を示すことを見いだしている。さらに、大腸菌などの桿菌は棒状の形をしているため、密集するとネマチック配向秩序が生じることがある²³⁾(図1(l), 図2(e))。こうしたアクティブ液晶状態は、バクテリアに限らず、上皮細胞、線維芽細胞、神経幹細胞など様々な細胞集団でも観察されている^{24,25)}。

ここでは、アクティブ液晶状態についてもう少し具体的に解説しよう。通常の液晶と同様、アクティブ液晶は配向秩序で特徴づけられるが、通常物質との最大の違いは、粒

子が運動や成長・分裂をすることにある(図2(e)は非運動性の大腸菌であるが、成長・分裂のためアクティブ液晶とみなせる)。この効果は、ネマチック秩序変数 Q に比例したアクティブ応力項 $\sigma = -\zeta Q$ を液晶理論に加えることで表現できる。その結果、アクティブ液晶では、トポロジカル欠陥が自発運動するなどの特徴が生まれる^{24,25)}。さらに近年は、欠陥が細胞を引き寄せたり遠ざけたり、遺伝子発現を引き起こしたりするほか、刺胞動物ヒドラが再生する際の器官形成の位置決めでの役割も示唆されるなど、様々な生命現象との関わりが報告され、大変注目されている^{24,25)}。竹内研究室でも、分子性液晶と細胞集団の両方を扱っている強みを活かし、生命と液晶の繋がりについてさらに研究を進めたいと考えている。

4. トポロジカル欠陥と液晶

改めて言うまでもなく、トポロジカル欠陥は液晶にとって極めて重要な存在だ¹⁾。中でも基本的な欠陥である disclination は、三次元液晶では線欠陥として存在する。ネマチックという語が、ギリシャ語で紐を意味する *νήμα* に由来することからもわかるように、液晶では disclination を二次元的に素朴に観察するのは容易である。しかし、線欠陥としての disclination の三次元構造を精確に計測するのは自明でなく、近年もいくつかの手法が提案されている。我々は、蛍光色素が欠陥に集積する現象²⁶⁾を活用し、disclination の三次元ダイナミクスを直接計測を報告した^{27,28)}(図1(a))。特に、線欠陥の繋ぎ換え現象に着目したところ、それが超流動ヘリウムなどの量子渦の繋ぎ換えと同じスケール則に従うこと、二次元液晶で知られている点欠陥ダイナミクスの非対称性が、三次元では消失していることなどの興味深い結果を得た。我々は、このような対称性回復が起こるための一般的条件を提案し、ほかの物理系に考察を拡げている。



図3 竹内研究室メンバー (2023年12月).

トポロジカル欠陥の重要性は、本稿でも既に何度も登場したことからも窺える。3章で見たアクティブ液晶と欠陥の関係は、現状多くの研究が観察に留まるが、液晶実験技術を活用すれば、欠陥を介した生命現象の制御という道も拓けるのかもしれない。また、2章で紹介した液晶乱流の非平衡スケーリング則は、欠陥の集団ダイナミクスが本質だ。欠陥の三次元観測により、マイクロ側の自由度である欠陥の非平衡ダイナミクスが明らかになれば、集団・マクロ極限で見いだした普遍的な非平衡スケーリング則の起源に迫れるのかもしれない。マイクロとマクロを繋ぐ、統計力学の本懐を、実験でできたらカッコいいなあ、と夢見ている。

5. むすびに

はじめに宣言したように、当研究室は実験統計力学研究室と名乗っている。事実、材料として液晶を使っているのは少数派で、バクテリア、粉体、コロイドなど、実験題材は色々だし、一部ではあるが理論的研究も行っている(図1)。それにもかかわらず、多くのテーマで、配向秩序やトポロジカル欠陥、相転移など、様々なキーワードを介して液晶の話と繋がってくるのだから面白い。このような物理学の普遍性、つまり、本来は別々であるはずの現象や材料、概念が繋がってしまう不可思議な事実と奥深さこそが、私が研究を始めて以来、心惹かれ続けていることなのかもしれない。液晶はそれと相性が良いようだ。

このような拡がりは、私自身、それぞれの題材を触り始めたときは想像もつかなかった。しかし、優秀で意欲的な研究室メンバーの皆さん(図3)やOB/OGの皆さんが色々な研究テーマを発掘し、研究に取り組んだ結果、私の浅かな想像を超える発見や拡がりが積み重ねられてきた。もちろん、共同研究者の方々が様々な知見・技術をもって協力してくださったこと、研究交流させていただいている方々との議論、会議での思いがけない出会いなども本質

だった。拡がりは、これからも、これから研究室に入る方々とも一緒に、続いていくのだろう。

謝 辞

本稿の執筆という貴重な機会をいただきました、吉田純先生はじめ、編集委員会の皆さまに厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) P. G. de Gennes and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals* (Oxford University Press, Oxford, 1995) 2nd ed., 5.3 節参照.
- 2) 竹内一将, 液晶, **24**, 218 (2020).
- 3) K. A. Takeuchi, M. Kuroda, H. Chaté and M. Sano, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 234503 (2007).
- 4) K. A. Takeuchi, M. Kuroda, H. Chaté and M. Sano, *Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.*, **80**, 051116 (2009).
- 5) 竹内一将, 日本物理学会誌, **70**, 599 (2015).
- 6) M. Sano and K. Tamai, *Nat. Phys.*, **12**, 249 (2016).
- 7) G. Lemoult, L. Shi, K. Avila, S. V. Jalikop, M. Avila and B. Hof, *Nat. Phys.*, **12**, 254 (2016).
- 8) P. Chantelot and D. Lohse, *Phys. Rev. Lett.*, **127**, 124502 (2021).
- 9) K. A. Takeuchi, *Physica A*, **504**, 77 (2018).
- 10) 竹内一将, 物性研究・電子版, **8**, 081205 (2020).
- 11) K. A. Takeuchi and M. Sano, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 230601 (2010).
- 12) K. A. Takeuchi, M. Sano, T. Sasamoto and H. Spohn, *Sci. Rep.*, **1**, 34 (2011).
- 13) K. A. Takeuchi and M. Sano, *J. Stat. Phys.*, **147**, 853 (2012).
- 14) Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 030602 (2017).
- 15) Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, *Phys. Rev. Lett.*, **124**, 060601 (2020).
- 16) T. Iwatsuka, Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, *Phys. Rev. Lett.*, **124**, 250602 (2020).
- 17) R. A. L. Almeida and K. A. Takeuchi, *Phys. Rev. E*, **104**, 054103 (2021).
- 18) 西口大貴, 物性若手夏の学校テキスト, **1**, 304 (2023).
- 19) T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi, *Commun. Phys.*, **4**, 238 (2021).
- 20) D. Nishiguchi, I. S. Aranson, A. Snezhko and A. Sokolov, *Nat. Commun.*, **9**, 4486 (2018).
- 21) P. Baconnier, D. Shohat, C. H. López, C. Coullais, V. Démery, G. Düring and O. Dauchot, *Nat. Phys.*, **18**, 1234 (2022).
- 22) H. Lama, M. J. Yamamoto, Y. Furuta, T. Shimaya and K. A. Takeuchi, arXiv:2205.10436.
- 23) T. Shimaya and K. A. Takeuchi, *PNAS Nexus*, **1**, pgac269 (2022).
- 24) 竹内一将, 細胞, **55**, 166 (2023).
- 25) A. Doostmohammadi and B. Ladoux, *Trends Cell Biol.*, **32**, 140 (2022).
- 26) T. Ohzono, K. Katoh and J.-i. Fukuda, *Sci. Rep.*, **6**, 36477 (2016).
- 27) Y. Zushi and K. A. Takeuchi, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **119**, e2207349119 (2022).
- 28) Y. Zushi, C. D. Schimming and K. A. Takeuchi, arXiv:2404.01480.

受理: 2024.1.26



Kazumasa A. TAKEUCHI

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・准教授
東京都文京区本郷7-3-1 (〒113-0033)

E-mail: kat@kaztake.org

専門分野: 非平衡統計力学, アクティブマター,
液晶, バクテリア, 非線形科学