

## A01-003 非平衡ゆらぎが生み出す構造と運動の普遍性

東京大学大学院理学系研究科 佐野雅己

東京工業大学理学院 笹本智弘

東京工業大学理学院 竹内一将

本計画研究では、非平衡ゆらぎが生み出す構造と運動の普遍的な性質を明らかにするため、(1) ランダム成長界面のゆらぎに関する研究、(2) 非平衡相転移の普遍性に関する研究、(3) アクティブマターに関する研究の3つのテーマを主として推進している。各テーマに関する H27 年度の研究成果は以下のとおりである。

### [ランダム成長界面のゆらぎに関する研究]

(理論：笹本)  $q$  ボソン完全非対称単純排他過程( $q$ -TASEP)は、通常の TASEP を一般化したもので、各粒子のホッピング率が常に 1 ではなく、前方粒子までの距離に依存するものである。このモデル系は、Macdonald 多項式との関係が深いといった理由から、近年の KPZ 普遍性に関する研究の中で重要な役割を果たしているが、定常状態における解析は、モーメントの発散の問題等があり、なされていなかった。今年度はこの問題を解決した。まず 2 方向  $q$ -Whittaker 過程と呼ばれる確率測度を導入し、ある量の期待値を Ramanujan の和公式とテータ関数に対する Cauchy 行列式公式を用いるとフレドホルム行列式の形に書けることを示した。この表式を用いて漸近解析を行い、長時間における粒子の位置の揺らぎが、定常 KPZ 系における普遍分布 (Baik-Rains 分布) で記述されることを示した。また有限温度中の方向性のある高分子の問題に対しても同様の手法を適用出来る事を示した(1)。また、1次元対称単純排他過程における着目粒子の大偏差を決定するという結果も得た。こちらについては現在論文を準備中である。

(実験：竹内) 竹内は研究室学生と協力し、液晶電気対流系とレーザーのホログラム技術を組み合わせることで、乱流領域の初期形状を自在に制御できる実験系を構築した。本技術を用いて、円形の乱流領域から内向きに成長する界面を測定したところ、平面 Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) サブクラスの普遍統計則が現れることを発見した(2)。また、海外研究者と共同で、外向き成長する円形界面の液晶実験や数値計算で現れる時間相関を定量し、共同研究者の理論と組み合わせ、円形 KPZ の持続的時間相関の解明に成功した(3)。さらに、KPZ 界面の  $1/f$  型パワースペクトルを解析し、そこから KPZ 定常界面の普遍的性質が調べられることを見出した(4)。

### [非平衡相転移の普遍性に関する研究]

竹内は、海外研究者らとの共同研究により、時空カオス系の有効記述を担う慣性多様体の情報が不安定周期軌道集団に埋め込まれていることを示した(5)。これにより、時空カオスも周期軌道の集団によって理解できる可能性が示唆された。さらに、A02 班の高橋雅裕氏、小林未知数氏との共同研究により、Gross-Pitaevskii 方程式における量子乱流転移が directed percolation (DP) クラスに属することの数値的証拠を得た(6)。これにより、量子乱流転移が、液晶乱流転移や古典流体のシア乱流転移と同じ普遍法則を示すことが判明した。

佐野等は古典流体で、チャンネル流におけるシア流による層流・乱流転移が DP クラスに属するという結果を昨年度末に発表した。今年度は、液晶電気対流における DSM2-DSM2 転移においてシア流を加える実験を行い、活性壁と移流のある条件で、チャンネル流の実験と同じ方法で測定を行い、液晶電気対流における DP 転移がこの条件下でもロバストであり、3つの

独立な臨界指数が測定できることを明らかにし、移流のある場合の測定方法の有用性を実証することに成功した。この成果は、現在、投稿準備中である。

### [アクティブマターに関する研究]

自己駆動粒子の低レイノルズ数流体中での集団運動の可能性を明らかにするため、Squirmerと呼ばれる球形粒子で表面流を仮定したモデルを用い、集団運動を乱す原因である流体相互作用を抑えるため、高さ方向に強く拘束された準2次元的境界条件の下で数値シミュレーションを行った。その結果、遠距離での流体相互作用は急激に減衰するものの、近距離での流体相互作用も重要となり、Neutral Swimmerと呼ばれる場合に集団運動が観測されたが、PusherやPullerの場合は集団運動は極めて形成されにくいことを明らかにした(7)。

そのため、アスペクト比の大きく細長い粒子を用いて集団運動を実現する手段を選んだ。具体的には、分裂とタンブリングを阻害した、長いフィラメント状のバクテリアを用いて、準2次元的に拘束された薄い容器内でネマチックな集団運動を観察した。密度を上げるとバクテリアは、弱いながらも衝突によりネマチックに向きを揃える効果を示し、空間の広い領域でネマチックオーダーパラメータが距離とともに一定値に収束する傾向を持ち、長距離の方向秩序と呼べる状態を実験系で始めて観測することに成功した。この長距離秩序状態で粒子数の密度ゆらぎを測定すると、Giant Number Fluctuationと呼べる振る舞いが観測され、種々の相関関数の振る舞いの無矛盾な結果が得られた(8)。

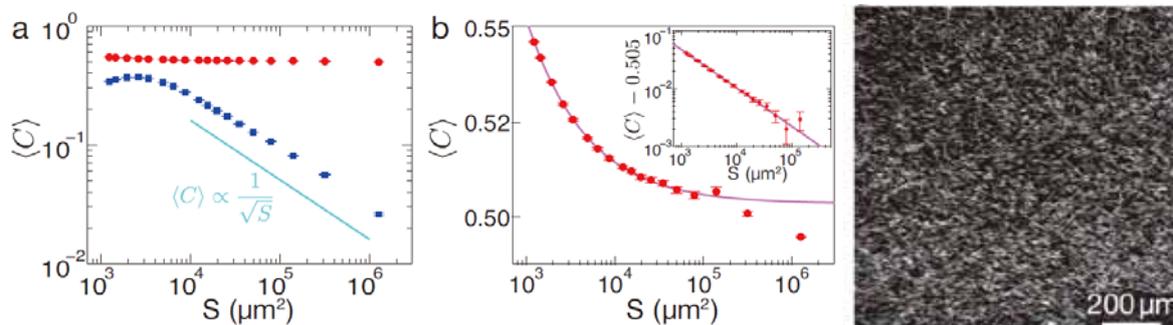


図1. 高密度で薄い容器に閉じ込められたフィラメント状バクテリア(*E. coli*)における長距離ネマチック秩序(右端)とネマチックオーダーパラメータ、a. 両対数プロット(低密度ランダム状態では面積 $S$ に対して $1/\sqrt{S}$ で減衰、高密度では飽和)、b. 定数+べきでフィット  
参考文献:

- (1) Sasamoto et al., arXiv: 1701.05991, 1701.06904
- (2) Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, arXiv: 1611.00650.
- (3) J. De Nardis, P. Le Doussal, and K. A. Takeuchi, arXiv: 1611.04756.
- (4) K. A. Takeuchi, arXiv: 1612.00152.
- (5) X. Ding, H. Chaté, P. Cvitanović, E. Siminos, and K. A. Takeuchi, *Phys. Rev. Lett.* 117, 024101 (2016).
- (6) M. Takahashi, M. Kobayashi, and K. A. Takeuchi, arXiv: 1609.01561.
- (7) J.-B. Delfau, John J. Molina and M. Sano, *EPL*, 114, 24001/1-5 (2016).
- (8) D. Nishiguchi, K.H. Nagai, H. Chate, and M. Sano, *Phys. Rev. E* 95, (2017) in press.