

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
東京工業大学大学院理工学研究科 笹本智弘
東京工業大学大学院理工学研究科 竹内一将
京都大学大学院工学研究科 山本量一

本計画研究では、非平衡系ゆらぎの普遍性を示す典型的な例として、界面成長におけるゆらぎ (KPZ 普遍性) と非平衡相転移の重要なクラスである Directed Percolation (DP 普遍性) に関する研究で複数の大きな進展があった。また、非平衡系のミクロとマクロをつなぐアクティブマターと呼ばれる新しい研究領域において、新現象の発見と分類等に貢献した。

[成長界面の形状とゆらぎに関する普遍性]

界面成長に見られる普遍的性質 (KPZ 普遍性) が、どの程度広いクラスの系で見出されるのか、理論面で笹本は、同時に関連する手法を一般化する研究を行った。Spohn との共同研究においては、粒子が同じ位置に来た場合に非対称な反射を行うような多数のブラウン運動粒子からなる系が KPZ 普遍性を示すことを見出した。Carinci, Giardina, Redig との共同研究においては、自己双対性を持つ広いクラスに対して議論する枠組みを構築し、その適用例として $UqSU(1, 1)$ 対称性を持つ KMP モデルの一般化にあたる多粒子確率過程モデルを導入した。今村氏との共同研究においては q ボソン完全非対称単純排他過程 (q -TASEP) と呼ばれるモデルの定常状態の揺らぎを調べる新たな手法を提案した。今村氏, Mallick 氏との共同研究においては、これらの手法を対称排他過程の着目粒子の大偏差揺らぎを決定することに拡張・適用することができることを示した。さらにその後 de Gier 氏らとの共同研究において、2成分排他過程の揺らぎを厳密に調べることができることを見出した。

実験で竹内は、成長過程に伴い生じる界面ゆらぎの普遍的スケーリング則、特にその界面形状との関係について取り組んだ。成長界面ゆらぎを記述する Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスは近年数理科学分野で目覚ましい進展を遂げているが、実験的研究は希少である。竹内は液晶乱流の成長過程に伴う界面ゆらぎを計測し、KPZ クラスの普遍ゆらぎの諸性質を測定した。1次元 KPZ クラスは、分布や空間相関は厳密解が既知であるが、時間相関は解くことができず、大きな未解決問題となっていた。竹内は、液晶乱流実験と様々な成長界面モデルのシミュレーションにより、円形界面と平面界面では時間相関が質的に異なること (1-3)、「エルゴード性の弱い破れ」という異常拡散と関連した性質を示すこと (2, 4) を発見した。こうした実験成果は理論家にも共有され、2017年には De Nardis と Le Doussal が、円形界面時間相関の解析的な近似解を導出することに成功した (2)。竹内はそれを実験的、数値的に検証し、円形界面が示す相関関数の持続性が説明できることを共同で発見した (2)。以上の成果により、KPZ 時間相関問題の主要部分を実験と理論の両面から解決することができた。さらに、竹内は大学院生らと協力して、KPZ クラスの顕著な特徴である初期条件依存性を調査するため、液晶乱流界面の初期条件を任意に制御可能な実験系を製作した。これにより、円から内向きに成長する界面の計測を行い、関連研究の類推に反して、それが平面界面の特徴を示すことを発見した (4)。以上の研究により、様々な非平衡現象を記述する KPZ クラスの普遍ゆらぎと構造の相互関係の理解を、実験的、理論的に大きく進展させることができた。

[層流・乱流遷移におけるゆらぎと時空間欠性の普遍法則]

マクロなゆらぎの起源を探ると、多くの場合、決定論的方程式が示すカオスや乱流に行きつく。その乱流がいつどのようにして発生するかは、従来様々の観点から調べられてきた。層流・乱遷移に関しては近年、パイプ流やジェット流、チャンネル流などのせん断（シア）流のある場合、層流状態は線形安定であり、有限振幅の擾乱で乱流化するが、一旦層流状態に落ちると自発的には乱流化しないため吸収状態転移に類似していることから、有向パーコレーション（Directed Percolation、以下 DP と約す）である可能性がモデル計算などで予測されていた。一方、実験的にはパイプ流ではシステムサイズが十分でなく、実験的検証が難しかった。佐野等は、準2次元のチャンネル流で境界条件を乱流にして下流でその乱流状態が減衰するか、あるいはパーコレートするかを界面臨界現象の手法を用いて測定した。オーダーパラメータとして乱流割合を取り、その空間依存性やラミナー間隔の分布などから、4つの臨界指数が(2+1)次元 DP の理論値と実験の誤差範囲で一致し、普遍的スケーリング関数の存在も示すことが出来た。また竹内は、領域内の高橋氏、小林氏との共同研究により、液晶乱流やNewton 流体の乱流相転移で見られた directed percolation 普遍クラスが、量子流体の乱流転移でも現れることを数値的に発見した。これにより、本普遍クラスが様々な非平衡流体系の普遍的理解に資することが明らかとなった。

[ミクロとマクロをつなぐアクティブマターにおけるゆらぎと構造]

各要素が自由エネルギーを変換し散逸を伴って自己駆動運動を行い、相互作用するアクティブマター系は、分子モーターや細胞集団、動物の群れなどミクロからマクロまで広く存在する大自由度非平衡系の一つのクラスを形成している。これらの系において、熱ゆらぎとマクロゆらぎの違い、運動や相互作用の対称性の違いなどにより、どのような分類や普遍性が存在するのか、現在世界中で精力的に研究が行われている。その中で、これまで理論的には、要素が向きを揃えた長距離秩序状態と異常な密度ゆらぎの存在が予想されながら、実験的には長距離秩序状態での密度ゆらぎの測定は存在しなかった。佐野等は、分裂と運動の反転を抑制した長いバクテリアを用いて、過去最大のシステムサイズでの方向秩序状態の存在と密度の異常ゆらぎを観測した。さらに、神経幹細胞の培養系では、運動し続ける細胞群がネマチック秩序状態を形成し、+1/2 の指数を持つトポロジカル欠陥には細胞が集積し、-1/2 の指数のトポロジカル欠陥では細胞密度が減少することを発見し、その振る舞いをアクティブマターを記述する方程式で再現することに成功した。また、Janus 粒子を用いた系で、微生物の走化性を模した実験を行い、ゆらぎ中で目標に向かうための最適戦略を理論で明らかにした。

参考文献：

- (1) K. A. Takeuchi and T. Akimoto, *J. Stat. Phys.* **164**, 1167-1182 (2016).
- (2) J. De Nardis, P. Le Doussal, and K. A. Takeuchi, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 125701 (2017).
- (3) K. A. Takeuchi, *J. Phys. A* **50**, 264006 (2017).
- (4) Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 030602 (2017).
- (5) Masaki Sano and Keiichi Tamai, *Nature Physics*, **12**, 249 (2016).
- (6) D. Nishiguchi, K.H. Nagai, H. Chate, and M. Sano, *Phys. Rev. E*, **95**, 020601(R) (2017).
- (7) K. Kawaguchi, R. Kageyama, and M. Sano., *Nature*, **545**, 327 (2017).
- (8) T. Mano, J.-B. Delfau, J. Iwasawa, and M. Sano *PNAS*, **114**, E2580 (2017).