

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
千葉大学大学院理学研究科 笹本智弘
東京大学大学院理学系研究科 竹内一将

非平衡物理の研究は、平衡系の熱統計力学の体系を拡張し、非平衡状態における法則を明らかにしたいという統計力学の伝統的な研究姿勢をベースに、遙か遠くには、非平衡過程としての生命現象を理解したいという目標を仰ぎ見ながら進んで来た歴史であるということもできる。それら二つの試みは、それぞれ別々に掘り下げられて来たが、両者を統合させようというのが本新学術の趣旨である。その意味で、この計画研究でもやはり2つの方向から非平衡の問題にアプローチする。その一つは、成長するランダムな界面という最もシンプルな非平衡過程の問題である。これは、非平衡系で厳密解が得られている数少ない問題であり、ごく最近精密な実験結果が得られるようになり、理論と実験の比較が可能となってきたことを背景としている。そこでは、ゆらぎにミクロとマクロの区別はなく、成長則と非線形性、ノイズの性質、そして初期条件が決まれば統計的なゆらぎの分布までもが普遍的な規則に従うという厳密に解析ができる非平衡現象を扱う。他の一つのテーマは、生命現象の持つ特徴の一つである自己組織化や自発性といった問題に物理的視点から取り組もうとするアクティブマターの物理である。この2つのテーマを互いに山の反対側から掘り進み、トンネルのようについには繋げてしまおうというのが本計画研究の目指すところである。以下に初年度の研究成果について述べる。

1. 界面成長のゆらぎと構造に関する研究

理論面で笹本は、界面成長に見られる普遍的性質(KPZ 普遍性)が、さらに広いクラスの系で見いだされる可能性についての考察を進めた。P.L. Ferrari, H. Spohn との共同研究においては、結合した1次元多成分 KPZ 方程式をかなり一般的な枠組みで取り扱い、系に固有なあるモードにおいては、多成分 KPZ 方程式の2点相関関数が、長距離・長時間の領域では1成分 KPZ 方程式の2点相関関数と同じように振る舞うと考えられる事を示した。関連して、多成分確率的格子気体は有効的には多成分 KPZ 方程式で近似されること、従って多成分格子気体においても固有モードでは1成分 KPZ 方程式の2点相関関数が現れる事を議論し、シミュレーションにおいて確認した。どのような状況においてどのモードがどの程度の精度で1次元 KPZ 方程式の性質で近似出来るかについての議論もある程度行ったが、詳細は今後の課題である。また、Dotsenko の先行研究にもとづき、KPZ 方程式の同時刻2点分布関数を長時間の極限で記述する過程が、別の系に対する研究から知られていた Airy 過程と呼ばれる過程で記述出来る事を確認した (Spohn, 今村氏との共同研究)。その他にも、相互作用するブラウン運動系や、KPZ 方程式の解析で有用な双対性の拡張についての研究を進め、現在論文を準備中である。

実験としては竹内が、Kardar-Parisi-Zhang (KPZ)クラスの界面成長の普遍ゆらぎに関して、最新の進展をまとめるレビュー論文(3)を執筆するとともに、実験・数値計算の双方から研究

を進展させた。実験的には、液晶電気対流の位相欠陥乱流が円の内向きに成長する場合の実験を立ち上げた。本実験では、初期条件として位相欠陥乱流をリング状に生成することが必要となるため、spiral phase plateなどの光学素子やリング状のパターンを施したマスクなど様々な手法を比較検討した。現状マスクを用いた成形方法が界面ゆらぎの測定に最適な界面を生み出しており、26年度では実際にその界面ゆらぎの測定を行う予定である。内向きに成長する円形界面は理論的にも数値的にも未だ調べられたことはなく、KPZ 普遍ゆらぎに関して、実験側から新たな普遍サブクラスを発見できる可能性がある。

また、竹内は、KPZ クラスにおける特異な時間相関を調べるため、界面ゆらぎが示す「弱いエルゴード性の破れ」に注目して研究を行った。弱いエルゴード性の破れとは、原理的には軌道が相空間全体を経めぐれるにもかかわらず、時間平均がアンサンブル平均と一致しなくなる現象である。竹内は、液晶乱流実験と数値モデルにより、平面界面と円形界面のどちらにおいてもエルゴード性が弱く破れていることを発見し、なおかつその破れ方が、弱いエルゴード性の理論研究で知られていたクラスには属さないことを示した。本成果は KPZ クラスの時間相関に関する新たな知見であるだけでなく、臨界現象一般の動的側面に新たな視点をもたらすものである。

2. アクティブマターのゆらぎと構造に関する研究

外力が働かない状況下で、エネルギーを消費しながら自律的な運動を起こす物質は、アクティブマターと呼ばれ、非平衡系における非自明な構造の典型例として近年盛んに研究が行われている。非平衡系特有の時空間構造として散逸構造という概念があるが、孤立した構造が自己駆動する現象に焦点を当て、その自発的対称性の破れやエネルギー変換のメカニズム、自己駆動粒子が多数集まった場合の新規の集団現象などに新たな物理を見いだそうとする試みであり、非対称なコロイド粒子の運動から、細胞運動まで幅広い実験系が対象となる。今年度は理論面からは、変形しながら運動する粒子モデルに関して、乗算ノイズが生じる機構を提案した(4)。また、単一の細胞が基板上を運動する際の法則性を調べる目的で、細胞の Traction Force Microscopy の手法を開発し、得られた応力分布のダイナミクスから応力場の多重極展開を行い、運動との相関を調べた。その結果、力の双極子成分が重心の運動する軸を決め、四重極成分が運動の向きを決めているという規則を見いだした(5)。これにより、一見ランダムな細胞性粘菌のアメーバ運動の運動方向を予測することが可能となった。さらには、加振された粒子の濃厚懸濁液に生じるホール構造の安定性と完結的な分裂現象に関する実験を解析し、モデルを提案した(6)。

参考文献:

- (1) P.L. Ferrari, T. Sasamoto, H. Spohn, J. Stat. Phys. 153, 377-399 (2013).
- (2) T. Imamura, T. Sasamoto, H. Spohn, J. Phys. A. 46, 355002 (2013).
- (3) K. A. Takeuchi, J. Stat. Mech. P01006 (2014).
- (4) M. Y. Matsuo, H. Tanimoto and M. Sano, EPL 102 40012 (2013).
- (5) H. Tanimoto and M. Sano, Biophys. J. 106, 16-25 (2014).
- (6) H. Ebata and M. Sano, Phys. Rev. E 88, 053007/1-8 (2013).