

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25103004

研究課題名(和文)非平衡ゆらぎが生み出す構造と運動の普遍性

研究課題名(英文)Universalities in motion and structure out of nonequilibrium fluctuations

研究代表者

佐野 雅己(Sano, Masaki)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：40150263

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 65,900,000円

研究成果の概要(和文):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。の理論では、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。実験では、円形界面と平面界面では時間相関が質的に異なることを発見した。では、層流・乱流転移におけるDP転移の観測に成功した。

研究成果の概要(英文):In this research project, large progresses have been made in three aspects; Theoretical and experimental findings on Kardar-Parisi-Zhang Universality on fluctuations in growing interface, Experimental finding of Directed Percolation (DP) Universality in laminar-turbulence transition in shear flow, Discoveries and classification of novel properties in active matter systems.

研究分野：非平衡系物理学

キーワード：非平衡統計力学 非平衡ゆらぎ 界面ゆらぎ 非平衡相転移 アクティブマター

1. 研究開始当初の背景

近年、ミクロな非平衡系における熱ゆらぎの普遍的性質が発見され、様々な物質と非平衡状態への展開が急務となっている。一方、マクロな非平衡系においては、不安定性を起源とする自己組織化やマクロゆらぎの発生機構の理解が大きく進んだが、マクロな非熱的ゆらぎの普遍性に関しては未だ謎のままである。

2. 研究の目的

平衡系における普遍法則を探求するため、相関長の発散が系の詳細を打ち消してしまうことによる普遍性、詳細釣合いなどの微視的な対称性に由来する普遍性などに着目し、これらの一層の深化と両者が交差する現象について研究を行う。そのため、第一に、液晶乱流界面を用いて、界面成長の非平衡ゆらぎが従う法則について、対称性や保存則、初期条件を制御することにより、その全貌を明らかにする。また、チャンネル流の乱流転移が方向性のあるパーコレーション転移(DP)であることの実証を目指す。これにより、非平衡相転移がメソスコピック系とマクロ系の両方で普遍的に存在することを明らかにする。第二に、アクティブマターの実験系を実現し、非平衡系に特有の集団運動と熱ゆらぎや非熱的ゆらぎとの関係を明らかにする。これらの系を用い、理論との緊密な連携の下、ゆらぎが本質的な役割を果たす非平衡系の普遍法則とその広がりを探求する。

3. 研究の方法

以上の背景の下、本研究では第一に、液晶乱流界面を用いて、界面成長の非平衡ゆらぎが従う法則について、対称性や保存則、初期条件を制御することにより、その全貌を明らかにする。また、チャンネル流の乱流転移がDPであることの実証を目指す。これにより、非平衡相転移が小さな系とマクロな系の両方で普遍的に存在することを明らかにする。第二に、非平衡ゆらぎが変形と局所的勾配を誘発し、並進運動を生み出すアクティブマターの実験系を実現し、非平衡系に特有の集団運動と熱ゆらぎや非熱的ゆらぎとの関係を明らかにする。これらの系を用い、理論との緊密な連携の下、ゆらぎが本質的な役割を果たす非平衡系の普遍法則とその広がりを探求する。

4. 研究成果

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、理論面で筈本は、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) と呼ばれる模型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, Mallik 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、「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を見出した。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。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見出した。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見出した。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、パイプ流やクエット流、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な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。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計38件)

Daiki Nishiguchi, Junichiro Iwasawa, Hong-Ren Jiang and Masaki Sano, Flagellar dynamics of chains of active Janus particles fueled by an AC electric field, *New Journal of Physics* 20, 015002/1-14 (2018). 査読有
DOI: 10.1088/1367-2360/aa9b48

Takaki Yamamoto and Masaki Sano, Theoretical model of chirality-induced helical self-propulsion, *Physical Review E* 97, 012607/1-11 (2018). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012607

Yasufumi Ito and Kazumasa A. Takeuchi, When fast and slow interfaces grow together: connection to the half-space problem of the Kardar-Parisi-Zhang class, *Physical Review E* 97, 040103(R)/1-6 (2018). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevE.97.040103

Takahisa Fukadai and Tomohiro Sasamoto, Transient Dynamics of Double Quantum Dots Coupled to Two Reservoirs, *Journal of the Physical Society of Japan*, 87, 054006/1-22 (2018). 査読有
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.054006>

Yohsuke T. Fukai and Kazumasa A. Takeuchi, Kardar-Parisi-Zhang Interfaces with Inward Growth, *Physical Review Letters* 119, 030602/1-5 (2017). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.030602

Kazumasa A. Takeuchi, 1/f power spectrum in the Kardar-Parisi-Zhang universality class, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 50, 264006/1-17 (2017). 査読有
<https://doi.org/10.1088/1751-8121/aa7106>

Jacopo De Nardis, Pierre Le Doussal, and Kazumasa A. Takeuchi, Memory and Universality in Interface Growth, *Physical Review Letters* 118, 125701/1-5 (2017). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.125701

Kyogo Kawaguchi, Ryoichiro Kageyama and Masaki Sano, Topological defects control collective dynamics in neural

progenitor cell cultures, *Nature*, 545, 327-331, (2017). 査読有
doi:10.1038/nature22321

Takaki Yamamoto and Masaki Sano, Chirality-induced helical self-propulsion of cholesteric liquid crystal droplets, *Soft Matter*, 13-18, 3328-3333, (2017). 査読有
DOI: 10.1039/C7SM00337D

Takashi Imamura, Kirone Mallick and Tomohiro Sasamoto, Large Deviations of a Tracer in the Symmetric Exclusion Process, *Physical Review Letters*, Volume 118, Issue 16, id.160601(2017). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.160601

Tomoyuki Mano, Jean-Baptiste Delfau, Junichiro Iwasawa, and Masaki Sano, Optimal run-and-tumble based transportation of a Janus particle with active steering, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, E2580-E2589 (2017). 査読有
<https://doi.org/10.1073/pnas.1616013114>

Jacopo De Nardis, Pierre Le Doussal, and Kazumasa A. Takeuchi, Memory and Universality in Interface Growth, *Physical Review Letters* 118, 125701/1-5 (2017). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.125701

Kyogo Kawaguchi, Ryoichiro Kageyama and Masaki Sano, Topological defects control collective dynamics in neural progenitor cell cultures, *Nature* 545, 327-332 (2017). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevE.97.040103

Daiki Nishiguchi, Ken H. Nagai, Hugues Chate, and Masaki Sano, Long-range nematic order and anomalous fluctuations in suspensions of swimming filamentous bacteria, *Physical Review E* 95, 020601(R) /1-6 (2017). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevE.95.020601

Takashi Imamura and Tomohiro Sasamoto, Free energy distribution of the stationary 0' Connell-Yor directed random polymer model, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, Volume 50, Issue 28, article id. 285203 (2017). 査読無
DOI: 10.1088/1751-8121/aa6e17

Kazumasa A. Takeuchi and Takuma Akimoto, Characteristic Sign Renewals of Kardar-Parisi-Zhang Fluctuations,

Journal of Statistical Physics 164, 1167-1182 (2016). 査読有
DOI 10.1007/s10955-016-1582-0

Xiong Ding, Hugues Chate, Predrag Cvitanovic, Evangelos Siminos, and Kazumasa A. Takeuchi, Estimating the Dimension of an Inertial Manifold from Unstable Periodic Orbits, *Physical Review Letters* 117, 024101/1-5 (2016). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.024101

J.-B. Delfau, John J. Molina and M. Sano, Collective behavior of strongly confined suspensions of squirmers, *Europhysics Letters* 114, 24001/1-5 (2016). 査読有
DOI: 10.1209/0295-5075/114/24001

John J. Molina, Kotaro Otomura, Hayato Shiba, Hideki Kobayashi, Masaki Sano, and Ryoichi Yamamoto, Rheological evaluation of colloidal dispersions using the smoothed profile method: formulation and applications, *Journal of Fluid Mechanics* 792, 590-619 (2016). 査読有
DOI:10.1017/jfm.2016.78

Takao Ohta, Mitsusuke Tarama and Masaki Sano, Simple model of cell crawling, *Physica D* 318, 3-11 (2016). 査読有
<https://doi.org/10.1016/j.physd.2015.10.007>

⑲ Masaki Sano and Keiichi Tamai, A Universal Transition to Turbulence in Channel Flow, *Nature Physics* 12, 249-253 (2016). 査読有
DOI:10.1038/nphys3659

⑳ Gioia Carinci, Cristiana Giardina, Frank Redig, and Tomohiro Sasamoto, A generalized asymmetric exclusion process with $U_q(\mathfrak{sl}_2)$ stochastic duality, *Probability Theory and Related Fields* 166(3), 887-933 (2016). 査読有
DOI 10.1007/s00440-015-0674-0

㉑ Daiki Nishiguchi and Masaki Sano, Mesoscopic turbulence and local order in Janus particles self-propelling under an ac electric field, *Physical Review E* 92, 052309/1-11 (2015). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevE.92.052309

㉒ Shoichi Toyabe, Masaki Sano, Nonequilibrium Fluctuations in Biological Strands, Machines, and Cells, *Journal of the Physical Society of Japan* 84, 102001/1-17 (2015). 査読有
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.84.102001>

②⑤ Tomohiro Sasamoto, Herbert Spohn, Point-interacting Brownian motions in the KPZ universality class, *Electronic Journal of Probability* 20, 1-28 (2015). 査読有
DOI: 10.1214/EJP.v20-3926

②⑥ Alexei Borodin, Ivan Corwin, Leonid Petrov, and Tomohiro Sasamoto, Spectral theory for interacting particle systems solvable by coordinate Bethe ansatz, *Communications in Mathematical Physics* 339(3), 1167-1245 (2015). 査読有
DOI: 10.1007/s00220-015-2424-7

②⑦ Timothy Halpin-Healy, Kazumasa A. Takeuchi, A KPZ Cocktail: Shaken, not stirred... -Toasting 30 years of kinetically roughened surfaces, *Journal of Statistical Physics* 160, 794-814 (2015). 査読有
DOI 10.1007/s10955-015-1282-1

②⑧ Hiroyuki Ebata and Masaki Sano, Swimming droplets driven by a surface wave, *Scientific Reports* 5, 8546/1-7 (2015). 査読有
DOI:10.1038/srep08546

②⑨ Takaki Yamamoto, Masafumi Kuroda, and Masaki Sano, Three-dimensional analysis of thermo-mechanically rotating cholesteric liquid crystal droplets under a temperature gradient, *EPL* 109, 46001/1-6 (2015). 査読有
DOI: 10.1209/0295-5075/109/46001

③⑩ Ismael S. S. Carrasco, Kazumasa A. Takeuchi, Silvio da Costa Ferreira Junior, and *Tiago José Oliveira, Interface fluctuations for deposition on enlarging flat substrates, *New Journal of Physics* 16, 123057/1-20 (2014). 査読有
DOI: 10.1088/1367-2630/16/12/123057

③⑪ Alexei Borodin, Ivan Corwin, Tomohiro Sasamoto, From duality to determinants for q-TASEP and ASEP, *Annals of Probability* 42, 2314-2382 (2014). 査読有
DOI: 10.1214/13-AOP868

③⑫ Hirokazu Tanimoto and Masaki Sano, A Simple Force-Motion Relation for Migrating Cells Revealed by Multipole Analysis of Traction Stress, *Biophysical Journal*, 106, 16-25 (2014). 査読有
<https://doi.org/10.1016/j.bpj.2013.10.041>

③⑬ Kazumasa A. Takeuchi, Experimental approaches to universal out-of-equilibrium scaling laws: turbulent liquid crystal and other developments, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, P01006, 1-28 (2014). 査読有
DOI :10.1088/1742-5468/2014/01/P01006

③⑭ Hiroyuki Ebata and Masaki Sano, Bifurcation from stable holes to replicating holes in vibrated dense suspensions, *Physical Review E* 88, 053007/1-8 (2013). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevE.88.053007

③⑮ Patrik L. Ferrari, Tomohiro Sasamoto, Herbert Spohn, Coupled Kardar-Parisi-Zhang Equations in One Dimension, *Journal of Statistical Physics* 153, 377-399 (2013). 査読有
DOI 10.1007/s10955-013-0842-5

③⑯ Takashi Imamura, Tomohiro Sasamoto, Herbert Spohn, On the equal time two-point distribution of the one-dimensional KPZ equation by replica, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 46, 355002/1-9 (2013). 査読有
DOI:10.1088/1751-8113/46/35/355002

[学会発表](招待講演:計90件)

Masaki Sano, Thermophoresis, Self-Propulsion, and Collective Behavior of Janus Particles, 12th International Meeting on Thermodiffusion (May 30- Jun. 3, 2016), Madrid, Spain. (Keynote talk)

Masaki Sano, Masahito Uwamichi, and Kyogo Kawaguchi, Topological Defects Control Collective Dynamics in Active Matter, *Fundamental Problems in ACTIVE MATTER* (Jan. 26 - Feb. 2, 2018), Aspen Center for Physics, USA. (Invited)

Masaki Sano and Kyogo Kawaguchi, Topological Defects Control Collective Dynamics in Active Matter, *STOCHASTIC THERMODYNAMICS, ACTIVE MATTER AND DRIVEN SYSTEMS*, ICTS Workshop (Aug. 7-11, 2017), Bangalore, India. (Invited)

Masaki Sano, Thermal and Electric Effects in Active Colloid: Thermophoresis, Self-Propulsion, Self-Assembly, Gordon Research Conference on Plasmonically-Powered Processes (Jun. 25-30, 2017), Hong Kong, China, (Invited)

Masaki Sano and Kyogo Kawaguchi, Orientational Order and Topological Defects in Active Matter, 9th IUPAP International Conference on Biological Physics (Jun. 7-9, 2017), Rio de Janeiro, Brazil. (Invited)

Kazumasa A. Takeuchi, The Tracy-Widom distribution: a possible “central limit theorem” for certain correlated random problems, JAGFoS2017 (Sep. 21-24, 2017), Bad Neuenahr, Germany. (Invited)

Tomohiro Sasamoto, Fluctuations and integrability of the 1D KPZ equation and discrete models, International Workshop on Classical and Quantum Integrable Systems (Jul. 24-28, 2017), Dubna, Russia. (Invited)

Tomohiro Sasamoto, Large deviation of a tagged particle for stationary 1D symmetric simple exclusion process, Non-equilibrium dynamics in classical and quantum systems: from quenches to slow relaxations (Jul. 13-15, 2016), Pont-a-Mousson, France. (Invited)

Kazumasa A. Takeuchi, Growth with noise: experiments and theory, Nonequilibrium Statistical Physics & Active Matter Systems – School and Workshop (Aug. 8-20, 2016), Beijing, China. (Invited)

Masaki Sano and Keiichi Tamai, A Universal Transition to Turbulence in Channel Flow, Extreme events and criticality in fluid mechanics: computations and analysis (Jan. 25-29, 2016), Toronto, Canada. (Keynote)
他 8 0 件

〔図書〕(計 4 件)

佐野雅己、丸善出版、特集：ゆらぎと構造から見る非平衡の世界、巻頭言、パリティー 32, No. 11, 2 ページ、2017 年

佐野雅己、丸善出版、総論：非平衡科学の新展開、パリティー 32, No. 11, 6 ページ、2017 年

竹内一将 (共訳)、吉岡書店、ムースの物理学 構造とダイナミクス、pp.1-336, 2016 年

佐野雅己 (共著)、岩波書店、キリンの斑論争と寺田寅彦、2014 年、pp.63-79、ISBN : 978-4-00-029620-5

〔その他〕
ホームページ等

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 雅己 (SANO, Masaki)
東京大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：4 0 1 5 0 2 6 3

(2) 研究分担者

竹内 一将 (TAKEUCHI, A. Kazumasa)
東京工業大学・理学院・准教授
研究者番号：5 0 6 2 2 3 0 4

笹本 智弘 (SASAMOTO, Tomohiro)
東京工業大学・理学院・教授
研究者番号：7 0 3 3 2 6 4 0