

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01826

研究課題名（和文）非平衡界面ゆらぎの大偏差計測に向けた重点サンプリング法の実験実装と実現

研究課題名（英文）Toward experimental realization of importance sampling for measuring large deviations of non-equilibrium interface fluctuations

研究代表者

竹内 一将（Takeuchi, Kazumasa）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：50622304

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：非平衡界面ゆらぎを記述するKardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスにおいて、大偏差の統計的特徴を実験計測する手法開発を目指し、数値計算手法である重点サンプリング法の一つを実験実装可能な形に改良・開発した。まず本手法を数値実装し、厳密解と比較することで、開発手法のコンセプト実証に成功した。液晶乱流実験系での実装に向け、ランダム性のある任意形状界面の生成手法開発を行い、典型ゆらぎの厳密解と比較することで有効性を実証した。リアルタイム画像解析手法については当初想定手法を変更し、新手法の目途をつけることができた。液晶乱流の素過程であるトポロジカル欠陥力学等についても成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

稀にしか起こらないが重要な現象は、災害など自然現象のほか、経済活動や社会現象にも見られ、統計的性質の理解は大きな学術的・社会的意義を有する。こうした大偏差の研究は、稀な事象であるがゆえに、実験研究は極めて困難である。本研究成果は、非平衡界面ゆらぎを舞台に、従来不可能であった大偏差の実験研究の端緒を開く重要な一歩である。また、非平衡界面ゆらぎ現象は、KPZの名で知られる普遍的スケーリング則を示し、統計力学、数理物理学、確率論、ランダム行列理論など、物理学と数学の諸分野が関わる他、関連する自然現象も、確率的粒子輸送現象、スピン鎖、開放量子凝縮系など多岐に渡るため、そこにも大きな学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：To develop an experimental method to study large deviations of non-equilibrium interface fluctuations in the Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) universality class, we focused on a version of the numerical scheme called the importance sampling and adapted it to our experimental system. First we tested the validity of the method numerically, by applying it to a solvable model and comparing with exact solutions. We also developed an experimental technique to generate arbitrary initial conditions with randomness in our target system based on liquid-crystal turbulence and marked steps toward real-time analysis of microscope images. We also studied microscopic elementary processes that result in the growth process of interest macroscopically, namely dynamics of topological defect lines, using a relaxation process from the turbulent state.

研究分野：非平衡統計力学

キーワード：大偏差 KPZ普遍クラス 界面ゆらぎ ランダム成長過程 確率的粒子輸送 重点サンプリング法 液晶乱流 トポロジカル欠陥

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

非平衡界面ゆらぎを記述する Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスは、一次元系で厳密解研究が進展し、分布関数や相関関数といった詳細な統計的性質が可積分モデルに対して厳密に調べられるようになったため、非平衡統計力学や数理物理学等における極めて重要な研究対象となっている。研究代表者は、液晶乱流の成長界面を実験的に高い統計精度で計測し、可積分モデルに対する厳密解の様々な統計法則を実験的に検証し、その普遍性を明らかにしてきた。

これら進展は、主として典型的な界面ゆらぎに関する統計法則であったが、確率的現象には稀なゆらぎ「大偏差」もあり、一般に統計学や確率過程などの文脈で研究されてきた。KPZ においても、理論的には大偏差に関する関心が高まりつつあり、研究が活発化している。それに伴い大偏差の数値研究も始まっているが、大偏差の研究には一般に、稀なゆらぎを起しやすくする仮想的な時間発展が必要であり、コンピュータ上では実装できても実験的には実現不可能であった。

### 2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、実験実装可能な KPZ 大偏差の計測手法開発を主たる目的とした。具体的には、数値計算法として開発されてきた重点サンプリング法のうち、軌道の複製に基づくものを基本技術として採用して、KPZ 大偏差の計測に使えるように改良・開発を行うこととした。また、本手法を液晶乱流実験に実装するにあたっては、コンピュータが生成する界面形状を液晶乱流において実際に生成し、それを初期条件とする界面成長を計測して、リアルタイムに統計情報を取得する必要がある。その手法開発も本研究の主要な部分である。以上を主たる目標に据えつつ、KPZ の物理学や、それが見られる液晶乱流現象についても理解を深化させる研究を展開することで、KPZ 物理学の多面的な進展に貢献することも目的の一部とした。

### 3. 研究の方法

以上の目的に向け、本研究で実施した項目ごとに、研究の方法を記載する。

#### (1) 実験実装可能な KPZ 大偏差計測手法開発

大偏差の数値的計測手法として知られる重点サンプリング法のうち、軌道のクローンに基づく「クローン法」を本研究では基本技術として採用する。クローン法は、図 1 に示すように、同一の条件化で多数の確率過程を計測し、ゆらぎが所定の傾向をもつ軌道を複製することで、統計的により重率が高まるように工夫する方法である。本研究では、クローンの増殖率を定める基準として界面の局所的高さを採用し、一次元 KPZ クラスの代表的理論モデルである完全非対称単純排他過程 (totally asymmetric simple exclusion process, TASEP) を例に数値的に実装した。KPZ 普遍法則が見られる代表的な初期条件に対して数値計算を実行し、厳密解との比較によって、本手法で大偏差が計測できることの実証を行った。また、厳密解が得られていない初期条件に対しても本手法を実行することによって、TASEP の KPZ 大偏差について新規の知見を提供することも試みた。

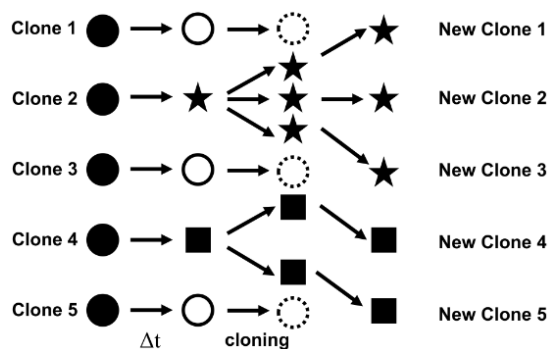


図 1 : クローン法の概略

#### (2) 液晶乱流実験における実装に向けた任意形状界面の生成手法開発

以上のクローン法を実験実装するには、コンピュータが選択したクローンに対する特定の界面形状を実験的に実現し、界面成長を計測する必要がある。このような任意初期条件の生成実験は、滑らかな初期条件については、研究代表者らの先行研究で実現済みであるが、本研究に必要なランダム性をもつ初期条件については実施されていなかった。そこで本研究では、ランダム初期条件の代表例としてブラウン運動型の初期条件を生成し、その場合の典型ゆらぎ法則である定常 KPZ サブクラスの検証を行った。また、界面のリアルタイム画像解析を実現すべく、実際の顕微鏡画像を用いて、FPGA 画像解析を目標とした手法調査を企業技術者と連携して行った。さ

らに、(1) のコンセプト実証の結果を踏まえ、大偏差の実験計測に必要なクローン数、クローン生成頻度や所要時間などの評価を行った。

### (3) KPZ 物理学および液晶乱流現象に関する関連研究

液晶乱流実験における大偏差現象を理解するには、本実験系で界面成長を担っている素過程の理解が重要である。そのため、本研究の液晶乱流現象の構成要素である液晶トポロジカル欠陥に着目し、欠陥の三次元ダイナミクスを直接計測する実験を実施した。さらに、自然発生では稀にしか実現しないような形状・配向構造も実現し欠陥の性質を調査するための実験手法として、液晶の光配向技術に基づくパターン配向制御の実験系を構築し、本手法によって特徴的な欠陥構造の生成を試みた。

また、本課題実施の間にも KPZ 物理学は急激な進展を続け、量子スピン系をはじめとする、予期せぬ物理現象との繋がりが次々と明らかになった。そこで、液晶実験や関連する数値計算を活用して、これら新規の KPZ 物理系を舞台とした新たな KPZ スケーリング則の開拓も行うこととした。

## 4. 研究成果

### (1) 実験実装可能な KPZ 大偏差計測手法開発

3. (1) に記載の KPZ クローン法を開発し、厳密解が存在するステップ初期条件の TASEP を解いたところ、負の大偏差、正の大偏差の双方についてキュムラント母関数  $\mu(k)$  の厳密解を数値的に再現することに成功した (負の大偏差の結果を図 2 に示す)。キュムラント母関数は、大偏差の確率分布を表すレート関数とルジャンドル変換で結ばれるため、本手法によって KPZ 大偏差の確率分布が正しく評価できることが実証された。

図 2 に示すキュムラント母関数  $\mu(k)$  は、正または負に大きくゆらいだ大偏差が観察されやすくするバイアスパラメータ  $k$  の関数である。 $|k|$  が小さい場合はバイアスが小さいため、典型ゆらぎに対応するスケーリング則が現れることも確認し、典型ゆらぎから大偏差へのクロスオーバーも本手法で捉えられることが判明した。一方で、本クロスオーバーのため、小さいバイアスに対してはキュムラント母関数の決定に長大な時間を要することも明らかとなった。

TASEP に対しては、ステップ初期条件の場合は大偏差の厳密解が既知であるが、他の初期条件については、平面初期条件や定常初期条件といった KPZ で比較的良好に用いられるものに対しては厳密解が得られていない。そこで我々は、本手法によってこれら未知の大偏差のキュムラント母関数を決定することを試みた。その結果、それぞれの大偏差について、興味深い初期条件依存性・非依存性があることが明らかとなった。

本手法開発とそれによる以上の結果は、本報告書執筆現在、論文準備中である。

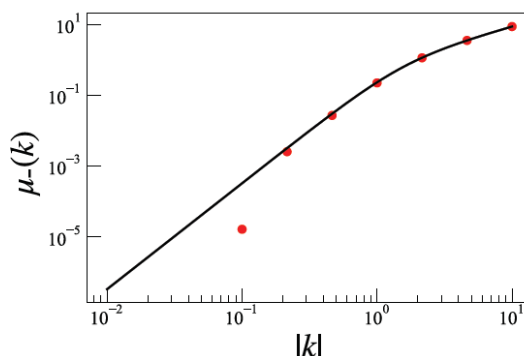


図 2: TASEP における開発手法のコンセプト実証結果。(点: 本手法による数値データ、実線: 厳密解)

### (2) 液晶乱流実験における実装に向けた任意形状界面の生成手法開発

クローン法の実験実装に必要な、ランダム性のある界面初期条件の生成手法開発として、レーザーホログラフィ技術を用いて、KPZ 定常界面に対応するブラウン運動型の初期条件の生成を試みた (図 3)。生成された初期条件が然るべき性質をもっていることの検証のため、本初期条件から成長した典型的な界面ゆらぎの分布や相関を計測し、KPZ 定常界面に関する厳密解の結果と整合することを実証した。KPZ 定常状態は、通常は収束に無限の時間を要するために実験検証は容易ではなかったが、本手法で定常状態に対応する初期条件を生成することにより、KPZ 定常状態の厳密解の普遍性に関して、初めての定量的な実験証拠を提示することに成功した。以上の成果は論文 [1] として発表した。

次に、界面のリアルタイム画像解析の実現に向け、図 3 の顕微鏡画像を用いて、FPGA 画像解析を目標とした手法調査を企業技術者と連携して行った。FPGA 上に実装可能な演算で顕微鏡画像の二値化等の画像解析を試み、小規模な画像に対しては解析が可能であることを確認したが、本実験に必要な高い解像度の画像に対してはメモリの扱いに困難があることが判明した。そこ

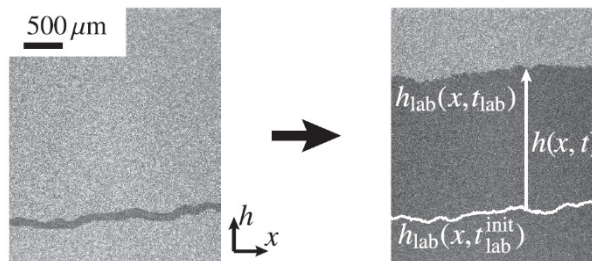


図 3: 開発手法を用いて実験的に生成したブラウン運動型初期条件と、その場合の界面成長 [1]

で本研究では、高速な CPU の並列演算によって画像解析を十分な速度で実行し、本研究の開発手法を実装する目途をつけることに成功した。現在、実装に向けて実験制御系の構築を準備中である。

### (3) KPZ 物理学および液晶乱流現象に関する関連研究

#### ① 液晶乱流を構成するトポロジカル欠陥ダイナミクスの研究

本研究の実験の舞台である、動的散乱モード 2 と呼ばれる液晶乱流現象は、液晶配向秩序に関するトポロジカル欠陥が高密度で存在する乱流状態であることがわかっているが、乱流中の欠陥を直接計測した報告はなく、欠陥がどのような密度で存在し、どのように相互作用し時間発展しているか、ほとんど何もわかっていない。これら欠陥ダイナミクスは、本研究の主たる対象である乱流界面成長の素過程であり、その理解は界面ゆらぎの大偏差の物理的起源を考えるうえでも重要な課題である。そこで本研究では、トポロジカル欠陥に蛍光色素が集積する現象を活用し、乱流からの緩和過程に着目することで、トポロジカル欠陥の三次元ダイナミクスを共焦点顕微鏡で直接観測することに成功した。それによって、欠陥運動を特徴づけるスケーリング則と対称性を明らかにした。以上は成果論文[2]で報告し、プレスリリース等を行った。

#### ② 量子スピン系や時空カオスにおける KPZ スケーリング則の探求

1 次元 Heisenberg モデルをはじめとする等方的相互作用のスピン鎖において、KPZ スケーリング指数や定常状態相関関数が現れるという報告があり、注目されているが、ごく最近では高次の統計量が KPZ と不一致であるという報告もあり、状況が混沌としている。研究代表者は、量子系の専門家と国際共同研究を開始し、KPZ 厳密解の知見を活用することで、スピン鎖においては KPZ スケーリング則が部分的に出現しているという特徴的な事実を明らかにした。以上の成果は、本報告書執筆現在、論文準備中である。また、研究代表者らは時空カオス現象の摂動においても KPZ スケーリング則に関わること、特に分布法則をはじめとする厳密解研究の統計法則が出現することを数値的に発見し、成果論文[3]で報告した。

#### ③ KPZ スケーリング則の現代的進展を普及する講義・講演・執筆活動

KPZ 物理学は厳密解研究によって革命的に進展し、そこから得られる洞察は KPZ クラスを超え、非平衡統計力学として重要な意義を持つ。特に近年は、②でも述べたスピン系の他にも、量子ポラリトン系、非線形輸送現象など、従来の KPZ 物理学が対象としてこなかった物理現象とも急速に関係が調べられている。その一方で、KPZ 厳密解研究の成果は数理的な側面が色濃く、物理分野において知見や洞察が十分に浸透しているとは言い難い。研究代表者は、国内外のスクール講演や総説執筆[4]などで積極的に、KPZ 厳密解研究をはじめとする現代的進展の内容を普及するための活動を行ってきた。

#### 引用文献

- [1] T. Iwatsuka, Y. T. Fukai, K. A. Takeuchi, Direct Evidence for Universal Statistics of Stationary Kardar-Parisi-Zhang Interfaces. *Phys. Rev. Lett.* **124**, 250602 (2020).
- [2] Y. Zushi, K. A. Takeuchi, Scaling and spontaneous symmetry restoring of topological defect dynamics in liquid crystal. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **119**, e2207349119 (2022).
- [3] Y. T. Fukai, K. A. Takeuchi, Initial perturbation matters: Implications of geometry-dependent universal Kardar-Parisi-Zhang statistics for spatiotemporal chaos. *Chaos* **31**, 111103 (2021).
- [4] 竹内一将, 液晶が切り拓く非平衡統計力学の普遍法則 -液晶乱流(動的散乱モード)を中心に-. *日本液晶学会誌* **24**, 218 (2020).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kato Airi N., Takeuchi Kazumasa A., Sano Masaki	4. 巻 18
2. 論文標題 Active colloid with externally induced periodic bipolar motility and its cooperative motion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 5435 ~ 5445
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/D2SM00363E	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Zushi Yohei, Takeuchi Kazumasa A.	4. 巻 119
2. 論文標題 Scaling and spontaneous symmetry restoring of topological defect dynamics in liquid crystal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2207349119
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.2207349119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shimaya Takuro, Takeuchi Kazumasa A	4. 巻 1
2. 論文標題 Tilt-induced polar order and topological defects in growing bacterial populations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PNAS Nexus	6. 最初と最後の頁 pgac269
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pnasnexus/pgac269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 竹内 一将	4. 巻 55
2. 論文標題 トポロジカルな点が導く、細胞の集団運動	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 細胞	6. 最初と最後の頁 166 ~ 169
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimaya Takuro, Okura Reiko, Wakamoto Yuichi, Takeuchi Kazumasa A.	4. 巻 4
2. 論文標題 Scale invariance of cell size fluctuations in starving bacteria	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00739-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fukai Yohsuke T., Takeuchi Kazumasa A.	4. 巻 31
2. 論文標題 Initial perturbation matters: Implications of geometry-dependent universal Kardar-Parisi-Zhang statistics for spatiotemporal chaos	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 111103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0071658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Almeida Renan A. L., Takeuchi Kazumasa A.	4. 巻 104
2. 論文標題 Phase-ordering kinetics in the Allen-Cahn (Model A) class: Universal aspects elucidated by electrically induced transition in liquid crystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 54103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.104.054103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takayasu Iwatsuka, Yohsuke T. Fukai, Kazumasa A. Takeuchi	4. 巻 124
2. 論文標題 Direct Evidence for Universal Statistics of Stationary Kardar-Parisi-Zhang Interfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 250602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.250602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 竹内一将	4. 巻 24
2. 論文標題 液晶が切り拓く非平衡統計力学の普遍法則	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本液晶学会誌	6. 最初と最後の頁 218-227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計37件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 柳橋勇太, 竹内一将
2. 発表標題 TASEPにおけるKPZ大偏差のpopulation dynamics シミュレーション
3. 学会等名 ipi-ダイキン シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Zushi, C. D. Schimming, K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Three-dimensional dynamics of intersecting reconnection of topological defect lines in liquid crystal
3. 学会等名 Advanced core-to-core network for the physics of self-organizing active matter Kick off meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Zushi, K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Scaling and symmetry of reconnecting nematic disclinations
3. 学会等名 The 7th International Soft Matter Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Zushi, K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Scaling and symmetry of reconnecting topological defect lines in liquid crystal
3. 学会等名 STATPHYS28 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 3D effect of topological defects in liquid crystal and living cells
3. 学会等名 Statphys Kolkata XII (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 3D effects of topological defects in passive and active liquid crystal
3. 学会等名 East Asia Joint Seminars On Statistical Physics 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi, H. Lama, M. J. Yamamoto, Y. Furuta, T. Shimya
2. 発表標題 Emergence of bacterial glass: two-step glass transition in 2D bacterial suspension
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Bacterial glass
3. 学会等名 The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Scaling and spontaneous symmetry restoring of topological defect dynamics in liquid crystal
3. 学会等名 The 12th Dynamics Days Asia Pacific (DDAP12) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Bacterial glass
3. 学会等名 Japan-France joint Seminar "Physics of dense and active disordered materials" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹内一将, 西口大貴
2. 発表標題 バクテリア集団の統計力学実験
3. 学会等名 新学術領域研究「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」第5回領域会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳橋勇太, 竹内一将
2. 発表標題 TASEP における KPZ 大偏差のPopulation Dynamicsシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関司陽平, 竹内一将
2. 発表標題 ネマチック液晶における欠陥再結合のスケーリングと対称性
3. 学会等名 2022年液晶学会討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関司陽平, 竹内一将
2. 発表標題 液晶におけるトポロジカル線欠陥再結合のスケーリングと対称性
3. 学会等名 第10回ソフトマター研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関司陽平, 竹内一将
2. 発表標題 液晶におけるトポロジカル線欠陥ダイナミクスの3次元蛍光イメージング
3. 学会等名 第14回光塾
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関司陽平, 竹内一将
2. 発表標題 液晶におけるトポロジカル線欠陥ダイナミクスの3次元観測
3. 学会等名 新学術領域研究「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」第6回領域会議
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 バクテリア集団のガラス転移
3. 学会等名 非平衡ソフトマター・アモルファス物質の物性解明への力学的自己組織化からの挑戦(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Kardar-Parisi-Zhang universality class
3. 学会等名 Stat&QuantPhys Autumn School 2022 (SQP2022) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi and Y. T. Fukai
2. 発表標題 Universality and Initial-Shape Dependence of Perturbation Dynamics in Spatiotemporal Chaos
3. 学会等名 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (DS21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Universal Kardar-Parisi-Zhang statistics explored in liquid crystal turbulence
3. 学会等名 Autumn Meeting of the Brazilian Physics Society 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 3D-induced polar order and topological defects in growing bacterial populations
3. 学会等名 2021 The Korean Physical Society Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Initial condition dependence of KPZ universality: from soft matter experiments to quantum spin chains
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Zushi and K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Confocal observation of reconnecting disclination lines in nematic liquid crystals
3. 学会等名 OLC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Zushi and K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Scaling and spontaneous symmetry restoring in reconnecting nematic disclinations
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi and T. Shimaya
2. 発表標題 3D-induced polar order & topological defects in growing bacterial populations
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Direct 3D observation of topological defect dynamics in liquid crystal
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting Online, Emergent Nonequilibrium Dynamics in Soft Materials (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 高密度バクテリア集団のガラス転移
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内一将, 関司陽平
2. 発表標題 液晶トポロジカル欠陥の3次元動力学観察と自発的対称性の回復
3. 学会等名 2022年 第69回 応用物理学会 春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 非平衡液晶としてのバクテリア集団とそのトポロジカル欠陥
3. 学会等名 さきがけ「トポロジ」領域 第5回領域全体会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 液晶欠陥の3次元ダイナミクス直接観察
3. 学会等名 さきがけ「トポロジ」領域 第6回領域全体会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋屋拓朗, 竹内一将
2. 発表標題 三次元的に成長する大腸菌集団中のトポロジカル欠陥と極性秩序
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Dynamic scaling of liquid crystal defects: microscopic and macroscopic views
3. 学会等名 Quantized vortices and nonlinear waves (量子渦と非線形波動)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 液晶実験から非平衡厳密解、そして量子多体系へ
3. 学会等名 物理工学の新展開(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 液晶乱流で調べる、非平衡の不可逆的相転移とエントロピー生成
3. 学会等名 山田科学振興財団 2020年度 研究交歓会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 液晶トポロジカル欠陥の三次元計測：ダイナミクスと構造の関係
3. 学会等名 さきがけ「トポロジー」領域 第3回領域全体会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 高密度バクテリア集団研究のための広域マイクロ灌流系と、それによる細胞集団の統計物理学・情報物理学実験の試み
3. 学会等名 第58回 日本生物物理学学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 高密度バクテリア集団の統計物理実験
3. 学会等名 新学術領域研究「生命の情報物理学」 第2回領域会議
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

竹内研究室ウェブサイト <a href="https://lab.kaztake.org/index-j.html">https://lab.kaztake.org/index-j.html</a>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------