

令和 2 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：2016～2019

課題番号：16H04033

研究課題名(和文) 遷流系を用いた中立的生態系実験の実現とその統計力学的解析

研究課題名(英文) Competition of neutral bacteria populations in a perfusion system and its statistical physics analysis

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) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、微小流体デバイスを用いて二つの細菌集団を培養し、競合させるモデル生態系実験を実現して、その結果を統計力学的な見地から解析した。まず、高密度の細菌集団を均一な環境で培養し、長時間計測できる灌流型の微小流体デバイスを開発した。それを用いて、蛍光タンパク質で標識した二つの大腸菌株を培養したところ、二集団の占有領域にフラクタル状のパターン形成を見出した。我々は、パターンの統計的特徴や菌の配向秩序との関係の解析を通し、本問題でトポロジカル欠陥が担う役割を提案した。また、競合過程を表す理論モデルを提案し、数値計算と理論解析から、非平衡統計力学におけるvoter普遍クラスとの関係を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、本来極めて複雑な存在である生態系や遺伝子集団の統計的変遷についても、中立的な生物種の競合過程については比較的単純な統計物理的概念によって解析や解釈が可能であることが示唆され、生態系、集団遺伝学、統計物理学、アクティブマター物理学等の境界領域に更なる研究の糸口を作ることができた。また、本研究で開発した新たな微小流体デバイス「広域マイクロ灌流系」は、高密度細胞集団が関わる様々な研究課題で有用であろうと期待でき、今後の基礎研究や応用研究に活用され、発展に貢献する可能性がある。

研究成果の概要(英文)：We studied competition of two neutral populations of bacteria cultured in a microfluidic device and characterized its spatiotemporal dynamics from the viewpoint of statistical physics. First we developed a novel, perfusion-type microfluidic device, which allows for long time-lapsed observation of dense bacterial populations under spatially uniform conditions. Using this device, we cultured two strains of Escherichia coli labeled with fluorescent proteins, and found formation of fractal patterns in the regions occupied by the two strains. Analyzing its statistical properties and the nematic order, we proposed a prospective role of topological defects in this problem. We also proposed a theoretical model for bacterial competition. Simulations and theoretical analysis of this model revealed relationship to the voter universality class in non-equilibrium statistical physics.

研究分野：統計物理学

キーワード：生物物理学 アクティブマター バクテリア 微小流体デバイス

1. 研究開始当初の背景

地球上では、様々な生物種が繁殖し、資源を奪い合い、捕食被食その他の影響を及ぼしあいながら、変動する環境下で共存している。そのような生物集団が織りなす生態系は、構造もダイナミクスも本来極めて複雑な存在であるが、一部の種同士の関係に注目するなどの方法で、比較的単純な数理的原理に基づいて生態系を理解しようとする試みは古くから存在する。また、遺伝子を主たる自由度と捉え、その集団の変動や相互作用等を記述する集団遺伝学においても、数理的、統計的な支配原理の模索が活発である。

このような研究において、従来は、総個体数や遺伝子出現頻度など、空間分布を考慮しないグローバルな変数によって問題を定式化し、理解を試みることが多かった。実験的にも、攪拌を伴う連続培養など、空間的な偏りが生じないような手法が開発されてきた。しかしながら、近年、生物個体の集団ダイナミクスや集団遺伝学において、空間構造が担う重要な役割が相次いで報告されており、注目を集めている。実験的には、寒天培地上のバクテリアコロニー形成が1つの標準的な実験手段となった。例えば、2種の大腸菌株を混合して寒天培地上に植菌し、培養すると、コロニー成長に伴って2つの菌集団は自発的に分離し、コロニー内で各集団が特徴的な空間パターンをもつ領域形成をすることが報告された(Hallatschekら、引用文献)。Hallatschekらは、コロニー外縁の形状ゆらぎが非平衡統計力学のKardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスに支配されていると仮定し、菌集団パターンの統計的特徴の説明に成功している。以上の先行研究は、空間構造の存在が集団の個体数変動や集団遺伝学における遺伝的浮遊に本質的な影響を及ぼすこと、それが非平衡統計力学の知見によって理解できうることの顕著な例であり、その後も、進化への影響をはじめとして、様々な観点から研究が進められている。

しかし、寒天培地におけるコロニー成長の実験では、培地中の栄養素が菌によって消費されていくため、コロニー内部では栄養が枯渇し、菌が活動を停止してしまう。つまり、菌が増殖し、競合して、空間パターンが動的に変化していくのは、コロニー外縁部に限られており、自然界で多くの生物種が置かれた状況と比較すると、極めて特殊な条件と言える。モデル実験としては、空間的に一様な培養条件下で、すべての菌が活発に活動する状況で、集団が作り出す競合パターンを長時間にわたり観察できることが望ましい。培養条件を制御し、長時間細胞が観察可能な実験系としては、近年は微小流体デバイスが様々な研究で活用されているが、シリコン系エラストマー(ポリジメチルシロキサン、PDMS)で流路を構成する標準的な微小流体デバイスでは、高密度菌集団では栄養素が供給口付近の菌で使い果たされてしまい、やはり空間的に一様な培養条件を維持するのが困難であった。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究課題では、観察領域内の全ての菌が成長、分裂し、生細胞としてのその他の活性も維持している条件下で、2つの菌集団を競合させるモデル生態系を実現し、そこで起こる集団ダイナミクスを観察して、統計力学的立場から解析を行う。2つの菌集団は中立的な力関係にある状況を主に扱う。具体的には、以下の3つを目的とし、それぞれに対して方法と成果を報告する。各項目で用いる箇条書き番号は共通である。

(1) モデル生態系実験実現のための実験系開発

本研究で掲げるモデル生態系実験を実施するためには、高密度の菌集団を、広い観察領域・長時間にわたって培養し、観察し続ける実験系が必要である。そこで本研究では、研究分担者の若本らが開発した、多孔質膜を用いた灌流型の微小流体デバイス(引用文献)の拡張を試みる。本デバイスでは、二次元的な観察領域に対して、多孔質膜を通して全面的に液体培地を供給できるため、全ての菌に対して一様な培養条件を保つことができる。一方で、従来デバイスでは観察領域を広くとることができなかつたため、従来デバイスを広域化した実験系の開発に取り組む。

(2) 開発デバイスを用いた菌集団競合過程の観察

(1)で開発した実験系を用い、2つの大腸菌集団を培養して、その集団の競合過程を観察する。複数のマイクロコロニーが成長するのに伴い、それらがどう競合し、空間パターンを形成するか、その統計的特徴は何かを計測する。2つの大腸菌集団は、蛍光標識を除いて遺伝的に等価であり、中立的な状況を主に扱うが、異なる菌株を用いた場合も実験を行い、結果の違いを考察する。

(3) 菌集団競合過程の理論モデルの提案と解析

上記の実験を念頭に、微小流体デバイスにおいて2つの菌集団が競合する過程を模した理論モデルを考案し、シミュレーションや理論計算によって、競合過程の時空間ダイナミクスやその統計力学的特徴を明らかにする。また、培養する菌の特性がそれらにどのような影響を及ぼすかを調査する。

3. 研究の方法

(1) 若本らが開発した灌流型の微小流体デバイス（引用文献）を原型とし、観察領域を広域化する拡張を行った。本デバイスの概略を図1に示す。フォトリソグラフィ技術とフッ酸エッチングによって作製したガラス基板に対し、細胞観察領域に菌液を滴下したうえで、観察領域を覆うように多孔質膜を接着する。従来デバイスでは、多孔質膜としてセルロースを用いていたが、セルロースは柔らかく撓んでしまうため、広い二次元空間を設けることができなかった。そこで本研究では、セルロース膜に多孔性 PET 膜を接着させることで剛性を増し、それによって従来デバイスより広い二次元的な領域の実現を可能とした（発表文献）。

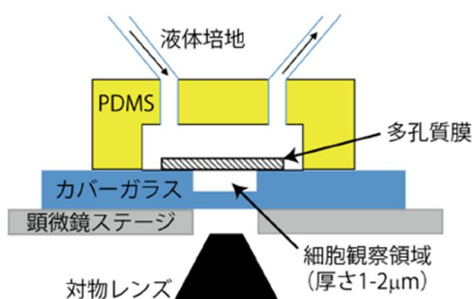


図1：広域マイクロ灌流系の概略図

我々は、本デバイスを「広域マイクロ灌流系」と名付け、本研究で実施するモデル生態系実験のほかに、高密度細胞集団に関わる様々な実験研究に有用だろうと期待している。

(2) 多孔質膜としてセルロースのみを用い、柱を並べてセルロース膜を支えることで広域化したデバイス（柱付きデバイス）と、セルロース-PET 二重膜を用いることで柱を取り払った広域マイクロ灌流系（柱なしデバイス）を用いて、2つの大腸菌集団を培養し、競合過程を計測した。菌株としては、大腸菌株 MG1655 に異なる色の蛍光タンパク質を発現させた株を用意し、蛍光観察によって2集団がそれぞれ占める領域を可視化した。画像解析によって領域パターン、特に領域境界が有する統計的特徴を解析した。また、位相観察画像の解析により、菌の配向の秩序変数や配向場を検出して、それらが領域パターンの時空間ダイナミクスにおいて果たす役割を調査した。

(3) チャネル状の流路において2つの菌集団が競合する状況を考え、図2のような格子模型を考案した。本模型では、各格子点に菌株 A または B のどちらかの菌体があり、菌体はチャネルの軸方向を向いているとする。各菌体は確率的に分裂し、母細胞と同じ遺伝子型の娘細胞を、確率的に選んだ隣接格子点に作る。その格子点にもともといた細胞は、流路の軸方向に押し出され、軸上の細胞が連鎖的に押し出されていって、末端の細胞が流路から抜ける。本模型の数値計算と理論計算により、菌株 A, B が占める領域パターンの時空間ダイナミクスの統計的特徴を調査した。また、拡張模型として、分裂時に遺伝子の突然変異が起こる場合、異種菌体どうしの攻撃が確率的に起こる場合も考え、それらが競合過程に及ぼす影響について調査した。

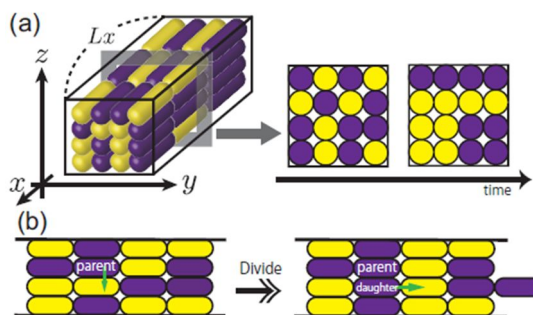


図2：菌集団競合過程のモデル（図は発表文献 から転載）

4. 研究成果

(1) 上記の方法で広域マイクロ灌流系を実際に製作し、性能評価を行った。PDMS をベースとした標準的な微小流体デバイスと、本研究で開発した広域マイクロ灌流系の双方で、袋小路形のチャネルを有する流路を製作し、大腸菌を培養した。結果、PDMS デバイスでは、流路の深部まで栄養素が行き渡らないため菌の成長が鈍化したのに対して、広域マイクロ灌流系では流路全体でほぼ一様な成長率が持続することを確認できた。また、培地交換性能の評価のため、デバイスに灌流する液を通常の緩衝液から含ローダミン緩衝液に切り替え、デバイス内の細胞観察領域におけるローダミン蛍光強度を共焦点顕微鏡で撮影して、培地交換に要する時間や一様性を評価した。以上の評価結果は、広域マイクロ灌流系を用いることで、高密度細胞集団を空間的に一様かつ切替可能な環境下で長時間培養できることを示しており、本研究課題の範疇を超えて様々な用途で有用だろうと考えられる。我々は、本デバイス開発や性能評価結果等について、発表文献 や学会講演等で広く成果普及に努めている。

(2) 柱付きデバイスと柱なしデバイスのそれぞれにおいて、黄色蛍光タンパク質を発現する MG1655 株、赤色蛍光タンパク質を発現する MG1655 株を同時培養し、その競合過程を観察した。結果、どちらのデバイスにおいても、マイクロコロニーの拡大・衝突等のために、二つの集団の占有領域境界のフラクタル化が見られた。フラクタル次元は、柱付きデバイスでは 1.2-1.7 程度（サンプル数 9）、柱なしデバイスでは 1.6-1.7 程度（サンプル数 3）と、後者の方が大きい傾向が見られたが、統計的有意性を判定するにはさらに実験を重ねサンプル数を増やす必要が

ある。

我々は、競合パターンのフラクタル化について、その形成メカニズムに菌集団の配向秩序が関わっているのではないかと考え、位相観察画像の解析によって、配向秩序変数と配向場を計測した。その結果、柱付きデバイスと柱なしデバイスのどちらにおいても配向のトポロジカル欠陥が多数発生していること、それが領域パターンの時空間ダイナミクスに大きな影響を与えていることを見出した。具体的には、巻き数 $+1/2$ の欠陥(図3(a))は図のようなコメット構造を持つが、コメットに垂直な菌の成長によってコメットの両側に菌を送り出す役割を担う。

巻き数 $-1/2$ の欠陥(図3(b))は3本の腕を持つが、壁面があると3本の腕のうち2本を壁面に沿わせることで、壁面に垂直に菌を送り出す役割を担う。これは、柱付きデバイスでは特に重要となる。以上のように、菌集団の競合過程では、フラクタルな境界を伴う複雑なパターン形成・時空間ダイナミクスが見られるが、トポロジカル欠陥に注目することで大局的な側面は記述できる可能性がある。本研究では、その素過程となる欠陥まわりの領域パターン時空間ダイナミクスを抽出することができた。

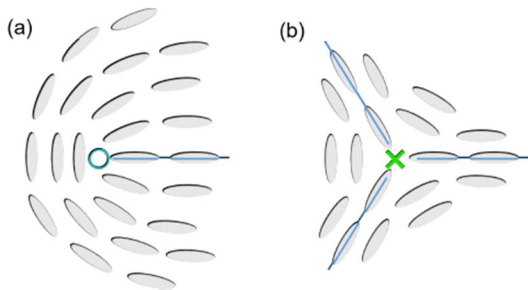


図3: 菌の配向秩序におけるトポロジカル欠陥。(a)は巻き数 $+1/2$ 、(b)は巻き数 $-1/2$ の欠陥を表す。

(3) 本研究で提案した菌集団競合過程のモデル(図2)を数値計算したところ、はじめは二つの菌集団がランダムに配置していても、増殖の結果、自発的にレーン構造を形成することがわかった(図4(a))。その際、レーンの太さは時々刻々と太くなっていき、特徴的なパターンとともに相関長が増大していく(図4(b))。そこで我々は、領域境界の長さなど、このパターン形成のもつ統計的特徴を計測したところ、これが非平衡統計力学における voter 普遍クラスに従うことを発見した。理論的にも、提案モデルの粗視化等によってチャンネル断面の近似的な時間発展を表す連続体方程式を導出し、それが voter モデルを記述する連続体方程式に帰着することを示した。

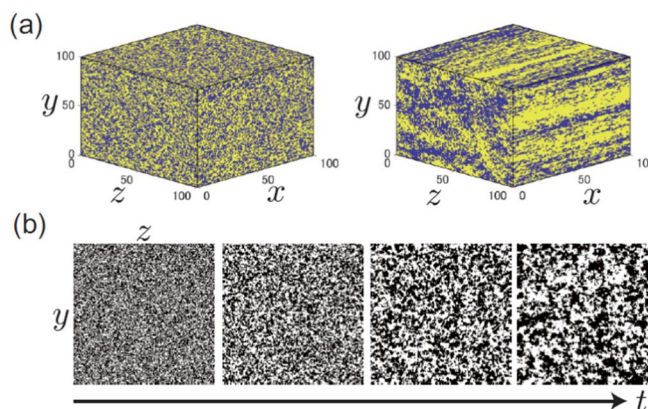


図4: 菌集団競合過程のモデル(図2)のシミュレーション結果(三次元)。x方向がチャンネル軸である。(a)三次元時間発展の様子(左: $t = 0$ 、右: $t = 50000$)、(b)yz断面の様子。x軸方向に菌株A,Bのどちらが多くいるかに応じて、白黒を表示している。図は発表文献 から転載。

また、突然変異や種間攻撃が起こる

拡張モデルについても数値計算を行い、突然変異が優位な場合はレーン形成が停止し二集団が混合した状態が継続すること、種間攻撃が優位な場合は二集団の一方が他方を凌駕し、より広い領域を占めるようになること、両者の間では臨界現象が現れることを見出した。拡張前のモデルで見られた voter 普遍クラスの統計法則はこの臨界点で見られる。我々は、拡張モデルに対しても連続体方程式を導出し、非平衡統計力学において、吸収状態転移の普遍クラスとして知られる voter 普遍クラスの連続体方程式(voter モデルの一般化に対応)との比較を通して、数値計算結果の理論的解釈を行った。以上の成果は、発表文献 や学会講演等で広く成果普及に努めている。

以上のように、本研究では「(1)モデル生態系実験実現のための実験系開発」「(2)開発デバイスを用いた菌集団競合過程の観察」「(3)菌集団競合過程の理論モデルの提案と解析」を実施した。中立的な菌集団競合過程において、フラクタル化や、トポロジカル欠陥との関係など、当初想定していなかった興味深い現象を見出した。その解析に注力したため、当初計画していた非中立的な二集団の競合過程は予備的な観察にとどまることになったが、それを除けば概ね計画時の構想にそって研究を実施することができた。本研究が一つの契機となって、微小流体デバイスを用いた生態系・集団遺伝学のモデル実験研究が一層発展し、その統計的性質や物理原理の探求が進んでいくことを期待したい。

< 引用文献 >

- O. Hallatschek *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **104**, 19926 (2007).
I. Inoue *et al.*, Lab Chip **1**, 50 (2001); Y. Wakamoto *et al.*, The Analyst **130**, 311 (2005).

< 発表文献 > (本報告書で引用したものだけを記載)

- T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto, and K. A. Takeuchi, arXiv: 2004.04903 (2020).

T. Shimaya and K. A. Takeuchi, Phys. Rev. E **99**, 042403 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 9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 Shimaya Takuro, Takeuchi Kazumasa A.	4. 巻 99
2. 論文標題 Lane formation and critical coarsening in a model of bacterial competition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 042403/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.042403	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 124
2. 論文標題 Kardar-Parisi-Zhang Interfaces with Curved Initial Shapes and Variational Formula	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 060601/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.060601	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 8
2. 論文標題 KPZ 普遍クラス - 厳密解と実験が奏でる非平衡のスケーリング則	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 物性研究・電子版	6. 最初と最後の頁 081205/1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14989/245743	査読の有無 無
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 Takeuchi Kazumasa A.	4. 巻 504
2. 論文標題 An appetizer to modern developments on the Kardar-Parisi-Zhang universality class	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	6. 最初と最後の頁 77 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2018.03.009	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 竹内 一将	4. 巻 45
2. 論文標題 結晶成長と平衡ファセット揺らぎの不思議な関係	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本結晶成長学会誌	6. 最初と最後の頁 45-2-05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.19009/jjacg.3-45-2-05	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 Kazumasa A. Takeuchi	4. 巻 50
2. 論文標題 1/f power spectrum in the Kardar-Parisi-Zhang universality class	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 264006/1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/aa7106	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 Yohsuke T. Fukai and Kazumasa A. Takeuchi	4. 巻 119
2. 論文標題 Kardar-Parisi-Zhang Interfaces with Inward Growth	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 030602/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.119.030602	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 Yasufumi Ito and Kazumasa A. Takeuchi	4. 巻 97
2. 論文標題 When fast and slow interfaces grow together: connection to the half-space problem of the Kardar-Parisi-Zhang class	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 040103(R)/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.97.040103	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 649
2. 論文標題 非平衡相転移におけるミクロとマクロ：吸収状態転移の例	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 数理科学	6. 最初と最後の頁 38-44
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 Kazumasa A. Takeuchi and Takuma Akimoto	4. 巻 164
2. 論文標題 Characteristic Sign Renewals of Kardar-Parisi-Zhang Fluctuations	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics	6. 最初と最後の頁 1167-1182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10955-016-1582-0	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 Jacopo De Nardis, Pierre Le Doussal, and Kazumasa A. Takeuchi	4. 巻 118
2. 論文標題 Memory and Universality in Interface Growth	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 125701/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.118.125701	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

〔学会発表〕 計57件 (うち招待講演 23件 / うち国際学会 27件)

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Revisiting circular vs flat interfaces and application of variational principle
3. 学会等名 MEC044: 44th Conference of the Middle European Cooperation, Key Challenges in Statistical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Disclination turbulence - from defect dynamics to macroscopic scaling laws -
3. 学会等名 2019 Gordon Conference on Liquid Crystals, Soft Order and Topology Motives in Biomedicine, Nanoscience, Cosmology, Living Matter and Emergent Industries (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. A. L. Almeida and K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Revisiting Model-A dynamic scaling laws in twisted nematics: phase ordering and critical percolation
3. 学会等名 FSP2019: Frontiers of Statistical Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Shimaya and K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Critical coarsening in a model of bacterial mixture inside a channel
3. 学会等名 FSP2019: Frontiers of Statistical Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Shimaya and K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Critical coarsening in a model of bacterial competition inside a channel
3. 学会等名 StatPhys 27 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Development of a new microfluidic device for observing dense bacterial populations in a controlled environment
3. 学会等名 JOINT 12th EBSA congress 10th ICBP - IUPAP congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Scale invariance of bacterial body size fluctuation during starvation
3. 学会等名 Workshop on Physics of Soft, Active and Living Matter (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 KPZ普遍クラス - 厳密解と実験が奏でる非平衡のスケーリング則 -
3. 学会等名 第64回 物性若手夏の学校 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 乱流転移に現れる臨界現象、普遍性
3. 学会等名 流体若手夏の学校 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋屋拓朗, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将
2. 発表標題 飢餓状態における大腸菌集団の形態応答
3. 学会等名 日本物理学会 2019 秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋屋拓朗, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将
2. 発表標題 Bundle structure and single-cell morphology in E. coli populations during transient to a starvation condition
3. 学会等名 第57回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 マクロ非平衡系の揺らぎと秩序形成 & 生命現象との関わり
3. 学会等名 新学術領域研究「生命の情報物理学」 第一回領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋屋拓朗, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将
2. 発表標題 広域マイクロ灌流系でみる細菌のReductive division
3. 学会等名 新学術領域研究「生命の情報物理学」 第一回領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本真大, 古田祐二朗, 竹内一将
2. 発表標題 大腸菌集団のactive jamming / MIPS?
3. 学会等名 新学術領域研究「生命の情報物理学」 第一回領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Shimaya, Y. Furuta, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Development of an "extensive micro perfusion system" for observation of glassy behavior in dense bacterial population
3. 学会等名 Physics of jammed matter (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Turbulent liquid crystal and competing bacteria: possible universal relaxation at criticality
3. 学会等名 LMU-UT Joint Workshop on Statistical and Biological Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Inoue, T. Shimaya, R. Okura, Y. Wakamoto and K. A. Takeuchi
2. 発表標題 Observation of competition of two Escherichia coli strains in a perfusion system
3. 学会等名 Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Shimaya and K. A. Takeuchi
2 . 発表標題 Critical coarsening in a model of bacterial competition inside a channel
3 . 学会等名 Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. A. Takeuchi
2 . 発表標題 Current status of absorbing-state transitions and connections to reversible-irreversible transitions
3 . 学会等名 Rheology of disordered particles - suspensions, glassy and granular materials (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. A. Takeuchi
2 . 発表標題 Liquid crystal turbulence as a probe to study non-equilibrium scaling laws and back
3 . 学会等名 27th International Liquid Crystal Conference (ILCC2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi
2 . 発表標題 Universal scaling laws of growth processes and their implications for chaos instability
3 . 学会等名 The 10th Dynamics Days Asia Pacific (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 古田祐二郎, 嶋屋拓朗, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将
2. 発表標題 高密度バクテリア集団における動的不均一性の解析とその展望
3. 学会等名 東京大学物性研究所短期研究会 ガラス転移と関連分野の最先端研究
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 嶋屋拓朗, 古田祐二郎, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将
2. 発表標題 均一な二次元空間中における細菌集団の長時間観測に向けた広域マイクロ灌流系の開発と展望
3. 学会等名 定量生物学の会 第九回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋屋拓朗, 竹内一将
2. 発表標題 競合するバクテリア集団モデルのレーン形成と再編ダイナミクス
3. 学会等名 定量生物学の会 第九回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋屋拓朗, 古田祐二郎, 大倉玲子, 若本祐一, 竹内一将
2. 発表標題 均一な二次元空間中における細菌集団の長時間制御観察に向けた広域マイクロ灌流系の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2019 年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. A. Takeuchi
2. 発表標題 The KPZ universality class: a glimpse of different physical problems from interface experiments
3. 学会等名 日本物理学会 2018 秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 液晶のトポロジカル欠陥乱流：非平衡の普遍的スケーリング則探求の舞台
3. 学会等名 新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」 第10回トポロジー連携研究会「非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象」 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 1D KPZ interfaces: theory and experiment
3. 学会等名 Fundamental Problems in Statistical Physics XIV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 The Tracy-Widom distribution: a possible "central limit theorem" for certain correlated random problems
3. 学会等名 日米独先端科学 (JAGFoS) シンポジウム (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Experimental observations of statistical laws for growing interfaces & some connections to crystal facet fluctuations
3. 学会等名 New developments in step dynamics on crystal surfaces: from nanoscale to mesoscale (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Structure controls fluctuations, but how? -in the case of growing interface fluctuations-
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Flat Growth vs Circular Growth -implications for interfaces and beyond-
3. 学会等名 The Berkeley Statistical Mechanics Meeting 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Toward the KPZ stationary state
3. 学会等名 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」第4回領域研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 吸収状態転移の物理学入門
3. 学会等名 Summer School 数理物理 2017 乱流とパーコレーション (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 界面成長のKPZ普遍クラス：実験と可積分模型の邂逅
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所・研究会 熱場の量子論とその応用 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 不可逆過程の非平衡相転移 - トイモデルから実験へ -
3. 学会等名 理研シンポジウム・iTHES/iTHEMS研究会 2017 非平衡物理の最前線 - 素粒子・宇宙から物性まで - (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 円形KPZ界面のメモリー効果：実験と理論
3. 学会等名 日本物理学会 2018 年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasufumi Ito and Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Approach to KPZ Half-Space Problem by Experiment and Simulation
3. 学会等名 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」 第4回領域研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yohsuke T. Fukai and Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Fluctuation of ingrowing Kardar-Parisi-Zhang interfaces
3. 学会等名 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」 第4回領域研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yujiro Furuta, Reiko Okura, Yuichi Wakamoto, Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Active jamming in a collection of E. coli
3. 学会等名 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」 第4回領域研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古田 祐二郎、大倉 玲子、若本 祐一、竹内 一将
2. 発表標題 大腸菌集団におけるactive jamming
3. 学会等名 第16回関東ソフトマター研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 嶋屋 拓朗、竹内一将
2. 発表標題 バクテリア集団とCritical coarsening
3. 学会等名 第11回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古田 祐二郎、嶋屋 拓朗、大倉 玲子、若本 祐一、竹内 一将
2. 発表標題 高密度バクテリア集団での動的不均一性
3. 学会等名 理研シンポジウム・iTHES/iTHEMS研究会 2017 非平衡物理の最前線 - 素粒子・宇宙から物性まで -
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 嶋屋 拓朗、竹内一将
2. 発表標題 バクテリア集団のToy ModelにおけるCritical coarsening
3. 学会等名 日本物理学会 2018 年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古田 祐二郎、嶋屋 拓朗、大倉 玲子、若本 祐一、竹内 一将
2. 発表標題 高密度バクテリア集団における動的不均一性
3. 学会等名 日本物理学会 2018 年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤康文、竹内一将
2. 発表標題 連結した2領域KPZ界面に対する数値的研究
3. 学会等名 日本物理学会 2018 年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Exploring Geometry Dependence of KPZ Interfaces
3. 学会等名 新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」 第3回領域研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Slow relaxation and aging of universal KPZ fluctuations: how different are circular and flat interfaces?
3. 学会等名 Stat'Phys 26 - Statistical Physics Conference Satellite, Non-equilibrium dynamics in classical and quantum systems: From quenches to slow relaxations (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi and Takuma Akimoto
2. 発表標題 Anomalous time correlation of KPZ and weak ergodicity breaking
3. 学会等名 STATPHYS26 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Growth with noise: experiments and theory
3. 学会等名 Nonequilibrium Statistical Physics & Active Matter Systems -- School and Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 異常拡散としてとらえる界面成長現象
3. 学会等名 異常拡散現象をめぐる最近の進展 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 ASEP as a surface growth model: universal fluctuation and its experimental test
3. 学会等名 Conference on Driven Stochastic Transport in Low-Dimensional Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Geometry-dependent interface fluctuations and their implications for chaos instability
3. 学会等名 Interdisciplinary Applications of Nonlinear Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Integrability and universality behind a random growth experiment
3. 学会等名 Frontiers in Mathematical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Exploring Geometry Dependence of Kardar-Parisi-Zhang Interfaces
3. 学会等名 Physical and mathematical approaches to interacting particle systems -In honor of 70th birthday of Herbert Spohn- (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内一将
2. 発表標題 KPZクラスにおける $1/f$ 的ゆらぎ
3. 学会等名 日本物理学会 2017 年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazumasa A. Takeuchi
2. 発表標題 Examples of absorbing-state transitions and universal hysteresis
3. 学会等名 International workshop on Glasses and Related Nonequilibrium Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	若本 祐一 (Wakamoto Yuichi) (30517884)	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授 (12601)	