

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25707033

研究課題名(和文) 液晶乱流が拓くマクロ非平衡系の実験統計力学

研究課題名(英文) Experimental statistical physics for macroscopic non-equilibrium systems using liquid-crystal turbulence

研究代表者

竹内 一将 (Takeuchi, Kazumasa)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50622304

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電気的に駆動した液晶の乱流状態を用いて、吸収状態転移と呼ばれる種類の相転移現象や界面成長現象における新たな普遍的物理法則の探求を行った。吸収状態転移については、符号反転対称性のもとでの臨界現象を測定するために最適な実験系を同定し、その実現に向けた諸測定を行った。界面成長現象については、(1)円から外向きに成長する界面、(2)円から内向きに成長する界面、(3)成長速度の異なる2領域中を成長する界面の3通りにおいて、界面ゆらぎにそれぞれどのような統計則が出現するか実験的または数値的に観測し、実験とモデルの比較や理論家との連携を通じて、結果の普遍性を検討した。

研究成果の概要(英文)：Using electrically driven liquid-crystal turbulence, we experimentally studied universal fluctuation properties in a type of phase transitions called absorbing-state transitions as well as growth of fluctuating interfaces. For the absorbing-state transitions, we determined an optimal condition for measuring critical behavior in the presence of up-down symmetry. For the growth phenomena, we experimentally or numerically realized the following three cases: (1) outward growth from a circle, (2) inward growth from a circle, (3) growth in two regions of different growth speeds. For each case we measured statistical properties of interface fluctuations. Universality of the results was also studied through comparison with numerical simulations and collaboration with theorists.

研究分野：統計物理学

キーワード：統計物理学 非平衡・非線形物理学 数理物理学 臨界現象 液晶 乱流 界面成長 スケーリング則

1. 研究開始当初の背景

伝統的な熱統計力学が成り立たないマクロ非平衡系は、どこまで統一的な理解が可能だろうか？ そのような系に出現する普遍法則の理解は重要な未解決問題の一つである。この観点から注目されているのが、臨界挙動や界面成長などのスケール不変な現象であり、理論的には、特に、(1)吸収状態相転移における普遍的臨界現象[1]、(2)揺らぎを伴う界面成長過程における普遍ゆらぎ[2]の存在が予言され、精力的に研究されてきた。こうした理論的成果は実験的実証が困難だったが、研究代表者のこれまでの研究により、電氣的に駆動する液晶の乱流状態において下記(1)(2)の成果を得ることに成功している。

(1) 吸収状態相転移における directed percolation (DP)クラス臨界現象の発見[3]

DP クラスは、吸収状態（一度入ったら出られない状態）への相転移のうち、余分な対称性や保存則を持たない最も基本的な場合に出現が期待される普遍法則の総称である。従って、非平衡臨界現象の理論でも DP クラスが最も深く研究されており、その実験証拠の欠如は長らく大きな問題とされてきた[1]。研究代表者は、液晶電気対流の乱流間転移 (DSM1-DSM2 転移) が吸収状態相転移の一例になっていることを見だし、静的・動的臨界現象を高精度で検証した結果、それが DP クラスに属することの定量的証拠を得ることに成功した。

(2) 揺らぎを伴う界面成長過程における Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) クラスの普遍ゆらぎの発見[4]

何らかの界面または表面が確率的に成長する現象は、基礎研究から産業分野まで広く見られる過程であるが、中でも相互作用が短距離で保存則等の制約のない基本的な場合は KPZ クラスと呼ばれる普遍法則が出現する。近年、1次元 KPZ クラスの一部模型が厳密に解かれるという重要な進展があり、初期条件に応じて、界面ゆらぎがランダム行列理論の最大固有値分布 (Tracy-Widom=TW 分布) に一致するという驚くべき結果が報告された[2]。研究代表者は、液晶の DSM2 乱流の界面成長を詳細に測定し、界面が円形の場合は GUE ランダム行列の TW 分布、界面が直線の場合は GOE ランダム行列の TW 分布が出現すること、従って、円形界面と直線界面が KPZ クラスの中で異なる普遍サブクラスを構成することを実験的に明らかにした[4]。これは可解模型に対する理論的結果が実験系でも普遍的に現れることを示した初めての実験である。

文献

[1] M. Henkel, H. Hinrichsen, and S. Lübeck, *Non-Equilibrium Phase Transition*

Vol.1 (書籍 2008).

[2] I. Corwin, *Random Matrices Theory Appl.* 1, 1130001 (2012); T. Sasamoto, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2016), 022A01.

[3] K. A. Takeuchi et al., *Phys. Rev. Lett.* 99, 234503 (2007); K. A. Takeuchi et al., *Phys. Rev. E* 80, 051116 (2009).

[4] K. A. Takeuchi and M. Sano, *Phys. Rev. Lett.* 104, 230601 (2010); K. A. Takeuchi et al., *Sci. Rep.* 1, 34 (2011); K. A. Takeuchi and M. Sano, *J. Stat. Phys.* 147, 853 (2012).

2. 研究の目的

上記(1)(2)のように、液晶乱流の実験によって、DP 臨界現象と KPZ 普遍分布という、非平衡の重要な普遍的スケールリング則の実在が明らかになった。一方で、こうしたスケールリング則は一般に、対称性等の基本的性質によって分類され、対称性毎に異なる普遍クラスが現れると理論的には考えられている。このような観点からは、これまでの実験は最も基本的な対称性に関する場合についてのみ成果であり、対称性を変えたり加えたりすることで新たな普遍法則の探求ができる。それを、(1)液晶の DSM1-DSM2 転移における吸収状態転移、(2)DSM2 乱流の KPZ 界面成長のそれぞれに対して実現し、各対称性のもとで出現する普遍法則について実験的知見を得るのが本研究課題の目的である。具体的には以下の内容を目的とした。

(1) 液晶配向制御により対称性を付加した DSM1-DSM2 転移の実現

DP 転移を示した実験系では、擬 2 次元セル表面の液晶分子は、表面に平行な面内で同じ向きに配向するように処理されていた (図 1a)。一方、上下面の分子配向が平行面内で直交した「ツイスト配向」(図 1b)を実現すると、セル内部では左捻じれ・右捻じれの配向が等確率で現れるため、捻じれに関する符号反転対称性、いわゆる Z_2 対称性が付加されるはずである。ただし、液晶配向に標準的に使われるラビング法では、配向場とセル表面の間に非ゼロの角度 (プレチルト角) が生じてしまうため、偏光紫外線や酸化ケイ素の蒸着を用いた別種の配向技術を電気対流セルに応用する必要がある。それを行い、液晶配向状態の評価を行って、DSM1-DSM2 転移の観察を行う。

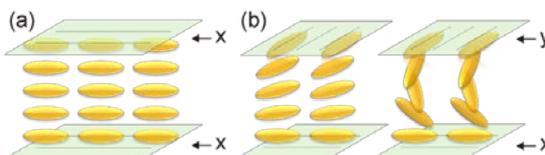


図 1: 従来の DP 実験[3]で用いた平面配向条件(a)と、本研究課題の(1)で用いるツイスト配向条件(b)。

(2)初期条件・界面形状の対称性の制御下における DSM2 界面成長の実現

1.(2)に記載した DSM2 乱流の KPZ 界面成長実験では、液晶に紫外パルスレーザーを打ち込み、DSM2 乱流の核生成を起こすことで、界面成長を生成した。この際、レーザーを1点に集光させれば円形界面ができ、円筒レンズを用いてレーザー光を直線状に広げれば直線界面が実現する。これらが異なる普遍サブクラスに属するというのが、これまでの研究で得られた成果であった。そこで本研究課題では、空間位相変調器や各種フィルターを用いてレーザー光の形状を図2に示すように自在に変更することで、異なるサブクラス間のクロスオーバー現象の解明や新たなサブクラスの実験的発見を目指す。また、同等の条件下で数値計算も行い、実験結果との比較検証等を行う。

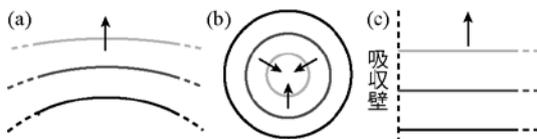


図2：様々な形状の成長界面の模式図。実際の界面にはこれに凸凹のゆらぎが伴い、それが普遍分布を示す。

3. 研究の方法

(1) 液晶配向制御により対称性を付加した DSM1-DSM2 転移について

対称性の高いツイスト配向条件の実現に向け、①感光性高分子膜と偏光紫外線を用いた液晶配向技術の導入、②一酸化ケイ素の真空蒸着による液晶配向技術の導入を行った。①については、ポリビニル桂皮酸(PVCI)の選択的感光性を用いた。PVCI に偏光紫外線を照射すると、側鎖が偏光軸に対して垂直になるように二量体が形成される。液晶分子はこの側鎖に沿って配向するため、偏光軸によって配向軸を決定でき、またプレチルト角も微小であることが報告されている[5]。②については、SiO または SiO₂ をガラス基板に真空蒸着させると、入射角に応じて異なる配向条件が実現されることが報告されている[6]。しかし、①や②の方法で作られた配向条件が電気対流に及ぼす影響は調べられていないため、ラビング法で作製した液晶セルとロール対流などを比較し、配向の精度や、本研究で重要となる位相欠陥の状態について評価した。

(2)初期条件・界面形状の対称性の制御下における DSM2 界面成長について

①有限半径の円を初期条件とする外向き・内向き円形界面成長 (図2ab) について

DSM2 界面の生成に用いるレーザー光の強度分布が、円状のプロファイルを持つよう

にビーム形状制御を行うことで、本課題の達成を目指す。そのための手法として、vortex phase plate を用いる方法、フォトマスクを用いる方法、空間位相変調器を用いる方法の3通りを検討したが、空間位相変調器を使う方法が最も精度よく目的の円形初期条件を生成できることが判明した。この手法を用いて実際に初期条件を生成し、そこから円の外向き・内向きに成長する界面の計測を行った。

また、実験と並行して、KPZ クラスに属することがわかっている非格子 Eden 模型を用いて数値計算を行い、同様の初期条件のもとでの界面ゆらぎの性質を計測した。その結果を、円形界面サブクラスや直線界面サブクラスの知見と比較し、クロスオーバー等の性質を調査した。

②境界条件を伴う界面成長 (図2c) について

1次元 KPZ クラスの理論研究では、境界条件を伴う半無限空間における界面ゆらぎの性質も調べられており、境界における界面傾き等の条件によっては GSE ランダム行列の TW 分布が出現することが可解模型に対して示されている[7]。半無限空間そのものを実験的に実現するのは不可能だが、我々は代わりに、図3のように界面成長速度の異なる二領域を実験的に実現することで、理論研究と類似の境界条件のもとでの界面成長を実現した。具体的な手法としては、フォトリソグラフィ技術を用いて、対流セルのガラス面上の透明電極を二領域に分割し、それぞれ独立に電圧を印加できるようにした。その際に電極間のギャップ幅を極力小さくすることで、境界において乱流そのものが断絶しないように配慮した。製作したセルを用いて、境界上の1点から界面成長を起こし、境界線における界面ゆらぎの性質を測定した。

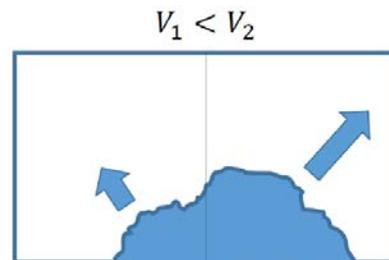


図3：成長速度の異なる二領域のもとでの界面成長の模式図。

文献

[5] Y. Iimura et al., J. Photopolym. Sci. Technol. 8, 257 (1995).

[6] W. Urbach, M. Boix, and E. Guyon, Appl. Phys. Lett. 25, 479 (1974); K. Toriyama and T. Ishibashi, in *Nonemissive Electrooptic Displays*, p. 145 (書籍 1976) .

[7] T. Sasamoto and T. Imamura, J. Stat. Phys. 115, 749 (2004); T. Gueudré and P. Le Doussal, Europhys. Lett. 100, 26006 (2012).

4. 研究成果

(1) 液晶配向制御により対称性を付加した DSM1-DSM2 転移について

偏光紫外線による液晶配向法を用いて対流セルを作製したところ、図4に示すように、配向が右捻じれの領域と左捻じれの領域の間の界面には、輪郭が明確なもの（タイプ1）と曖昧なもの（タイプ2）の二種類が生じることが判明した。これはどちらも位相欠陥からなると思われるが、セル表面におけるピン止め効果の強さや、電圧・温度変化に対する応答の観察から、タイプ1の界面では位相欠陥がバルク中に存在するのに対し、タイプ2の界面では位相欠陥はセル表面にトラップされていると考えている。従来のラビング法による液晶配向ではタイプ1の界面のみが見られており、DSM1-DSM2 転移の臨界現象を測定するためにはタイプ1の界面のみが存在する状況を用意する必要がある。タイプ2は、セル表面における係留効果が弱い場合に期待される界面であるから、偏光紫外線による配向制御法では本研究目的に必要な条件を満たさないと判定し、一酸化ケイ素の真空蒸着による配向制御法に切り替えて条件検討を継続した。本手法を用いて対流セルを作製し、平面配向条件で見られるロール対流の観察を行った結果、比較的強い係留効果を持つことが示唆された一方で、現時点で達成できた配向方向の精度には改善の余地がある。ここまでの成果をもとに今後更なる条件検討を行えば、 Z_2 対称性のもとでの DSM1-DSM2 転移の測定は十分可能と思われる。

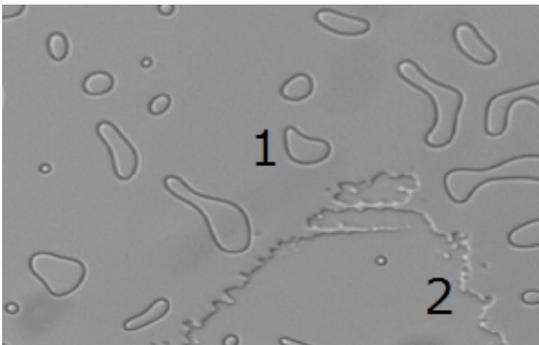


図4：偏光紫外線を用いて配向制御したツイスト配向セルにおいて、DSM2 乱流状態から電圧を切り、対流をなくした直後の様子。配向捻じれの異なる領域間の界面には二つの種類があることがわかる。

(2) 初期条件・界面形状の対称性の制御下における DSM2 界面成長について

①有限半径の円を初期条件とする外向き・内向き円形界面成長（図2ab）について

実験的には、vortex phase plate、フォトマスク、空間位相変調器の3つの手法のそれぞれで円状の強度分布をもつレーザー光を

生成し、それによる DSM2 乱流の核生成のパターンを評価した。結果、空間位相変調器を用いた手法が、必要な空間解像度と光強度の両方を達成し、理想に近い円形の界面初期条件を生成することに成功した（図5a）。本初期条件から内向きに成長する界面について、界面ゆらぎの性質を計測したところ、通常の円形界面と異なる挙動が認められたため、非格子 Edén 模型の数値計算との比較を組み合わせ解析を行うこととした。

非格子 Edén 模型の数値計算では、所与の半径の円状初期条件を用意したうえで、そこから内向きまたは外向きに成長する界面を生成し、そのゆらぎの性質を計測した（図5bc）。結果、外向き成長の界面に関しては、直線界面の性質である GOE TW 分布から円形界面の性質である GUE TW 分布へのクロスオーバーが起こっていることを見いだした。この結論は、ゆらぎ分布の1次-3次キュムラントや空間相関関数、時間相関関数においても確認され、キュムラントに対してはクロスオーバーを記述するスケーリング仮説の検討を行った。一方、内向きの界面成長に関しては、長い時間に渡って直線界面と同等の振る舞いを示すことが明らかになった。これは、何らかの曲率をもった界面は円形界面と同じ挙動を示すだろうという諸研究者の予想を裏切る結果である。以上の研究により、KPZ ゆらぎの普遍的性質が初期条件の曲率にどのように依存するかについて、正の曲率、負の曲率の双方の場合を明らかにすることができた。

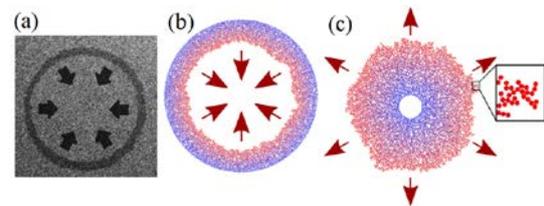


図5：液晶乱流実験(a)および非格子 Edén 模型の数値計算(bc)で生成した、内向き(ab)および外向き(c)に成長する円形 KPZ 界面。

②境界条件を伴う界面成長（図2c）について

3.(2)②で述べたとおり、セル表面の電極をフォトリソグラフィ技術で二領域に分割することで、成長速度の異なる二領域に渡った界面成長を実現した。この際、二領域のギャップ幅が異なる対流セルを製作し、各ギャップ幅に対し、ギャップ上での DSM2 乱流の相互作用の有無や位相欠陥密度の減少がみられるかを検討し、実験に最適なギャップ幅を決定した。結果、図6のように、二領域で異なる速度で成長する界面成長の実現に成功した。

図6では、境界上の一点から界面成長を始めているが、二領域で成長速度が異なるために、生じる界面はいびつな形状を取る。そこで、多数回の計測により界面の平均プロファイルを決定したところ、成長速度の遅い領域

では極めて直線的なプロファイルを取ることが判明した (図 7 挿図)。理論家との協力により、この非自明な挙動は理論模型の数値計算でも見られる、特徴的な挙動であることが明らかとなった。また、本課題の中心的な調査対象である、境界上の界面ゆらぎを計測した結果、境界においても、ゆらぎの振幅が時間 t に対して $t^{1/3}$ で成長するという KPZ の特徴的な成長則を見出すことができた (図 7)。また、分布関数の同定、特に GSE TW 分布の検証に向けた予備的なデータの取得に成功した。

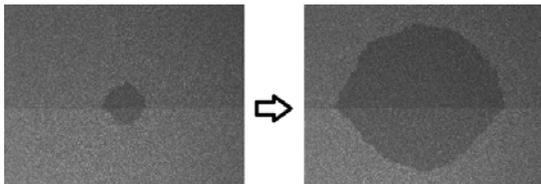


図 6: 二領域で成長速度の異なる DSM2 界面の成長。二領域は対流の濃淡で区別でき、上側の方が成長速度が速い。左右の写真は、それぞれ成長開始後 10 秒、40 秒の時点での界面を写したものである。

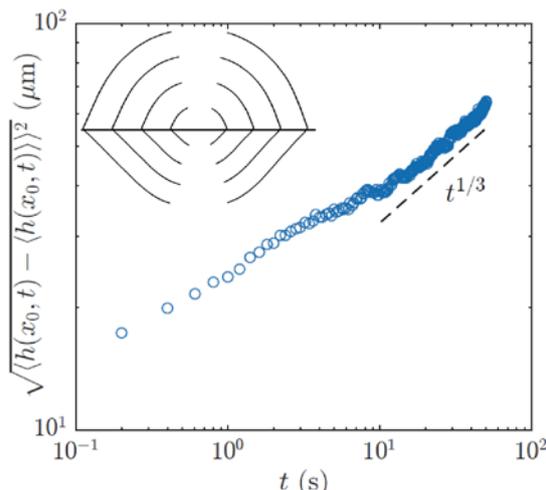


図 7: 二領域で成長速度の異なる DSM2 界面の、境界上における界面ゆらぎ振幅の時間変化。破線は KPZ クラスの場合の成長則 $t^{1/3}$ を表す。挿図は界面の平均プロファイルを示す。

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 10 件)

(1) X. Ding, H. Chaté, P. Cvitanović, E. Siminos, and K. A. Takeuchi, Phys. Rev. Lett., 査読有, 受理済.

<http://arxiv.org/abs/1604.01859>

(2) 竹内一将、確率的統計力学モデルと KPZ 普遍法則 —非平衡トイモデルが自然現象と出会うとき、数理科学、査読無、631 巻、26-31、2016

<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020674342>

(3) 竹内一将、To be, or not to be —吸収状態をめぐる非平衡臨界現象の物理学、日本物理学会誌、査読有、70 巻、599-607、2015

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009976841>

(4) T. Halpin-Healy and K. A. Takeuchi, A KPZ Cocktail: Shaken, not stirred... Toasting 30 years of kinetically roughened surfaces, J. Stat. Phys., 査読有, Vol. 160, 794-814, 2015

DOI: 10.1007/s10955-015-1282-1

(5) K. A. Takeuchi, Experimental realization of Tracy-Widom distributions and beyond: KPZ interfaces in turbulent liquid crystal, MSRI Publications, 査読有, Vol. 65, pp. 495-507, 2014

<http://library.msri.org/books/Book65/files/140409-Takeuchi.pdf>

(6) I. S. S. Carrasco, K. A. Takeuchi, S. C. Ferreira, and T. J. Oliveira, Interface fluctuations for deposition on enlarging flat substrates, New J. Phys., 査読有, Vol. 16, pp. 123057/1-20, 2014

DOI: 10.1088/1367-2630/16/12/123057

(7) K. A. Takeuchi, Experimental approaches to universal out-of-equilibrium scaling laws: turbulent liquid crystal and other developments, J. Stat. Mech., 査読有, Vol. 2014, pp. P01006/1-28, 2014

DOI: 10.1088/1742-5468/2014/01/P01006

(8) 竹内一将、目で見るランダム行列理論の統計則 —界面ゆらぎでの実例、応用数理、査読有、23 巻、58-67、2013

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009616454>

(9) K. A. Takeuchi and H. Chaté, Collective Lyapunov modes, J. Phys. A, 査読有, Vol. 46, pp. 254007/1-20, 2013

DOI: 10.1088/1751-8113/46/25/254007

(10) K. A. Takeuchi, Crossover from Growing to Stationary Interfaces in the Kardar-Parisi-Zhang Class, Phys. Rev. Lett., 査読有, Vol. 110, pp. 210604/1-5, 2013,

DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.210604

[学会発表] (計 27 件)

(1) K. A. Takeuchi, "Time correlation properties of KPZ fluctuations: from experimental perspectives", KITP program: New approaches to non-equilibrium and random systems: KPZ integrability, universality, applications and experiments, 2016 年 2 月 11 日, Santa Barbara (米国) .

(2) 竹内一将、「液晶が繋ぐ量子乱流と古典乱流 ～非平衡相転移という視点から～」、量子乱流と古典乱流の邂逅、2016 年 1 月 7 日、東京大学 (千葉県柏市) .

(3) K. A. Takeuchi, "Random-matrix distributions under microscope: evidence

for universal interfacial fluctuations”, RMT2015: Random matrix theory from fundamental mathematics to biological applications, 2015年11月2日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県国頭郡) .

(4) 竹内一将, 「さまざまなスケールで現れる界面ゆらぎの普遍法則」、第4回 関西若手物性研究会 さまざまなスケールから見る物性～ソフトマターからストリングまで～、2015年10月17日、大阪大学 (大阪府豊中市) .

(5) K. A. Takeuchi, “Universal Fluctuations of Growing Interfaces”, iCeMS International Symposium: Hierarchical Dynamics in Soft Materials and Biological Matter, 2015年9月24日, 京都大学 (京都府京都市) .

(6) K. A. Takeuchi, “Universal transitions to turbulence: from simple fluid to liquid crystal, and quantum fluid”, Yukawa International Seminar 2015 (YKIS2015): New Frontiers in Non-equilibrium Statistical Physics 2015, 2015年8月19日, 京都大学 (京都府京都市) .

(7) 竹内一将, 「非平衡ゆらぎの KPZ 普遍クラス: 界面から絶縁体抵抗まで」、統計物理学懇談会 (第3回)、2015年3月10日、慶應義塾大学 (神奈川県横浜市) .

(8) K. A. Takeuchi, “Universal fluctuations of growing interfaces and characterization via sign renewals”, Kyoto Winter School for Statistical Mechanics, 2015年2月17日, 京都大学 (京都府京都市) .

(9) 竹内一将, 「液晶で探る、ゆらぐ界面成長の非平衡普遍法則」、第8回 物性科学領域横断研究会、2014年11月22日、大阪大学 (大阪府豊中市) .

(10) K. A. Takeuchi, “Weak ergodicity breaking in KPZ-class interfaces”, Fluctuation and Correlation in Stochastic Systems, 2014年10月15日, 中央大学 (東京都文京区)

(11) 竹内一将, 「液晶の「量子渦」と乱流」、日本物理学会 2014 秋季大会、2014年9月9日、中部大学 (愛知県春日井市) .

(12) 竹内一将, 「ゆらぐ界面成長の普遍法則」、新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」 第一回若手勉強会「非平衡統計力学の基礎理論」、2014年8月8日、慶應義塾大学 (神奈川県横浜市) .

(13) K. A. Takeuchi, “Experimental evidence of KPZ growing interfaces and beyond”, School on Non-linear Dynamics, Dynamical Transitions and Instabilities in Classical and Quantum Systems, 2014年8月1日, Trieste (イタリア) .

(14) K. A. Takeuchi, “Covariant Lyapunov vectors capture the collective dynamics of large chaotic systems”, Dynamics Days Asia Pacific 08, 2014年7月22日, Chennai (インド) .

(15) 竹内一将, 「液晶の“量子渦”乱流が見せる非平衡臨界現象の世界」、物性研短期研究会 スーパーマターが拓く新量子現象、2014年4月17日、東京大学 (千葉県柏市) .

(16) K. A. Takeuchi, “Exploring universal scaling laws far from equilibrium with turbulent liquid crystal”, APS March Meeting 2014, 2014年3月4日, Denver (米国) .

(17) K. A. Takeuchi, “Experimental evidence for universal fluctuation properties of growing interfaces”, 12th Workshop on Stochastic Analysis on Large Scale Interacting Systems, 2013年11月23日, 東京大学 (東京都目黒区) .

(18) K. A. Takeuchi, “Critical phenomena out of equilibrium probed by liquid-crystal turbulence”, East Asia Joint Seminars on Statistical Physics 2013, 2013年10月23日, 京都大学 (京都府京都市) .

(19) K. A. Takeuchi, “Powerful and geometry-dependent universality in growing interfaces”, Small Systems far from Equilibrium: Order, Correlations, and Fluctuations, 2013年10月16日, Dresden (ドイツ) .

(20) K. A. Takeuchi, “Exploring universal out-of-equilibrium scaling laws with turbulent liquid crystal”, XXV IUPAP International Conference on Statistical Physics: STATPHYS25, 2013年7月26日, ソウル (韓国) .

[その他]

ホームページ等

<http://labjp.kaztake.org> (研究室)

<http://jp.kaztake.org> (研究代表者)

アウトリーチ活動

(1) 竹内一将, 「確率から生まれる自然法則～「統計物理学」が目指すもの～」、2014年11月1日、市川中学校・高等学校 (千葉県市川市) .

(2) 竹内一将, 「研究内容の紹介 / 研究者って何だろう?」、2013年11月20日、駒込高等学校 (東京都文京区) .

受賞

(1) K. A. Takeuchi, Young Scientist Prize, IUPAP (C3 commission), 2013年7月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 一将 (TAKEUCHI, Kazumasa)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 50622304