

令和元年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02212

研究課題名(和文)非平衡相転移としての層流・乱流転移における普遍法則の確立

研究課題名(英文) Universal laws in laminar turbulence transition as a nonequilibrium phase transition

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) 36,900,000円

研究成果の概要(和文)：これまでに、シア流における層流・乱流転移は有向性パーコレーション(DP)であるとの仮説に基づき、世界最大のチャンネル乱流実験装置を製作し、DP転移における3つの独立な臨界指数の測定に成功した。また、液晶の乱流系においても、移流の速度と印可電圧を制御しながらのDP転移を検証できる実験装置を製作し、一連の実験を行い、所定の成果を得た。また、理論的には、移流のある場合、境界が活性壁の場合、有限サイズ効果が無視できない場合に関して、臨界指数がどのように測定できるか、また普遍的スケーリング関数がどのようになるかについて考察とシミュレーションを行い、実験結果との比較に有益な結果を得ることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体の運動において、整った状態(層流)がいつどのようにして、乱れた状態(乱流)に遷移するのかは、世紀を超えて科学者が挑戦し続けている難問の一つである。20世紀終わりにカオスが発見され、閉鎖流における時間的乱れの発生機構が明らかになったが、パイプ流などの開放系のせん断流れにおいて、時空間的な乱れがどのような条件下で発生するのかは、19世紀のレイノルズの実験以来、未解決であった。我々は、統計力学的な視点を導入し、粗視化した乱流構造が時空間全体に広がるかどうかに着目することで、非平衡相転移の一種である Directed Percolation と呼ばれる普遍的な臨界現象と見做せることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Transition from laminar to turbulent flow drastically changes the mixing, transport, and drag properties of fluids, yet when and how turbulence emerges is elusive even for simple flow within pipes and rectangular channels. In this project, through extensive experimental investigation of channel flow, we identify a distinctive transition with critical behaviour. We identified 3 independent critical exponents and universal scaling relations which coincides with the theoretical predictions of (2+1)dimensional DP (Directed Percolation) transition. These results are not accidental, even if we consider the shortage in our system size and the existence of unstable solutions which grow slower than the observation time. We have also made experiments of turbulent liquid crystals under shear flow with an active wall and found that DP transition is robust against such conditions. Phenomenological theory and simulation for DP transition with advective flow and an active wall were also developed.

研究分野：非線形・非平衡物理学

キーワード：層流乱流転移 流れの安定性 Directed Percolation 非平衡統計力学 非平衡ゆらぎ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

流体の運動において、整った状態(層流)がいつどのようにして、乱れた状態(乱流)に遷移するのは、世紀を超えて科学者が挑戦し続けている難問の一つである。20世紀終わりにカオスが発見され、閉鎖流における時間的乱れの発生機構が明らかになったが、パイプ流などの開放系のせん断流れにおいて、時空間的な乱れがどのような条件で発生するのは、19世紀のレイノルズの実験以来、未解決であった。それに対して、パイプ流における局在した乱流構造である1個のパフが分裂して広がるか、それとも消滅してしまうかで、層流・乱流の転移点を決める実験や理論が発表され、新たに注目を集めていた。一方、我々のように統計力学的な視点を導入し、十分大きなシステムサイズと観測時間の下、粗視化した乱流構造が時空間全体に広がるかどうかに着目することで、層流・乱流転移が非平衡相転移の一種である Directed Percolation と呼ばれる普遍的な臨界現象と見做せるのではないかという見方が提案され、より大きなシステムサイズの実験系やシミュレーションの必要性が叫ばれていた。

### 2. 研究の目的

流体における層流・乱流転移は、世紀を超えて科学者が挑戦し続けている難問の一つである。20世紀終わりのカオスの発見は、閉鎖流の時間的乱れの発生機構を明らかにしたが、パイプ流などのシア流における時空間的乱れの発生は、19世紀のレイノルズ以来、未解決である。これに対して我々は、統計力学的な視点を導入し、粗視化により局在した乱流構造を1つの乱れた要素と見なし、その乱れが時空間全体に広がる(乱流への遷移)かそれとも消滅(層流状態への回帰)してしまうのか、大域的で統計的な振る舞いに着目することで、層流・乱流転移が吸収状態相転移の一種である有向パーコレーション(Directed Percolation: DP)と見なせることを提案した。我々は、世界最大規模となるチャンネル流装置を作成し、この問題に挑戦し、この仮説に対する実験検証とその詳細な解析を行うことを目的として研究を行った。

### 3. 研究の方法

シア流における層流・乱流転移は有向パーコレーション(DP)であるとの仮説に基づき、世界最大のチャンネル乱流実験装置を製作し、DP転移における3つの独立な臨界指数の測定と普遍的スケーリング仮説の検証、ラミナー間隔分布などの測定を行う。チャンネル流を選定したのは、空間2次元のチャンネル流の方が空間1次元のパイプ流よりも臨界指数が大きく、測定も容易なためである。また、観測時間が比較的短いという困難を克服するため、入口を乱流境界条件に設定し、乱流占有密度の空間依存性を見る、一点測定から時間情報を得るなど、シミュレーションと現象的理論から着想した新たな方法を導入し、これらの困難を克服する。さらに、DP転移であることが明確になっている液晶の乱流系において、マイクロ流路を用い、移流がある場合のDP転移の実験を行い、同様の測定を行い、DP転移のロバスト性を検証する。

### 4. 研究成果

これまでに、シア流における層流・乱流転移は有向性パーコレーション(DP)であるとの仮説に基づき、世界最大のチャンネル乱流実験装置を製作し、DP転移における3つの独立な臨界指数と1つのスケーリング関係の測定に成功した。また、ラミナー時間間隔の分布測定から普遍的スケーリング法則の存在を確認することができた。システムサイズは、これまでのチャンネル流実験で最も大きいですが、それでもまだ実験上の制約から十分とは言えない。また、特殊な有限摂動を加えた場合に、観測時間よりもゆっくりと成長する不安定モードが存在する可能性も指摘されている。しかし、これらの制約を考慮したとしても、3つの臨界指数と普遍的スケーリング関係が実験から矛盾なく推定される臨界レイノルズ数において同時に現れるという偶然は、ほとんど考えられないため、上記の極めてゆっくりしたモードは、我々の有限システムと活性壁の条件の下では成長できず、DP転移の性質が現れたものと解釈できる。しかし、シミュレーションでは周期性境界条件を用いて、極めて長時間の計算が可能となるため、実験との比較は難しいという問題は依然として残されている。この問題を解決に導くためには、周期性境界条件に相当する2重円筒を用いたギャップの極めて狭いテーラークエット流などの実験系が理想的であることが分かってきたが、本実験の計画期間と予算では行うことが難しく、今後の課題として残されている。したがって、レイノルズ以降130年も科学者が追求してきた問題に対する完全な回答を得るには、さらに大きなシステムによる実験と計算機実験が必要と考えられる。

一方、液晶の乱流系においても、移流の速度と印可電圧を制御しながらのDP転移を検証できる実験装置を製作し、一連の実験を行った。液晶の乱流系はニュートン流体ではなく、システムも異なるが、システムサイズが十分大きく取れる点で様々な実験検証に適した系である。実験の結果、DP転移が移流の存在に対してもロバストであること、活性壁の境界条件がDPの臨界指数の観測を容易にすることを裏付ける証拠を得ることができた。

また、理論的には、移流のある場合、境界が活性壁の場合、有限サイズ効果が無視できない場合に関して、臨界指数がどのように測定できるか、また普遍的スケーリング関数がどのようになるかについて考察とシミュレーションを行い、実験結果との比較に有益な結果を得ることができた。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 11 件)

1. Tamai Keiichi, Sano Masaki, How to experimentally probe universal features of absorbing phase transitions using steady state, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2018, 123207/1-24 (2018), 査読あり doi:<http://dx.doi.org/10.1088/1742-5468/aeab42>
2. 佐野雅己, 玉井敬一: 層流・乱流転移- 非平衡相転移としての乱流, 日本物理学会誌、73, 463-468 (2018), 査読あり
3. 佐野雅己, 玉井敬一: 有向パーコレーションと乱流遷移, 応用数理、29, 印刷中, (2019), 査読あり
4. T. Yamamoto, and M. Sano, Hydrodynamic rotlet dipole driven by spinning chiral liquid crystal droplets, Phys. Rev. E, 99, 022704 (2019). 査読あり <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.99.022704>
5. Yamamoto, Takaki, Sano, Masaki, Theoretical model of chirality-induced helical self-propulsion, Phys. Rev. E, 97-1, 012607/1-11 (2018), 査読あり doi:<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.012607>
6. 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), doi:<https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa9b48> 査読あり
7. 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](https://doi.org/10.1039/C7SM00337D).
8. 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 doi: [10.1073/pnas.1616013114](https://doi.org/10.1073/pnas.1616013114)
9. 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](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.020601)
10. 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](https://doi.org/10.1209/0295-5075/114/24001)
11. 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: [10.17/jfm.2016.78](https://doi.org/10.17/jfm.2016.78)

[学会発表](計 8 件)

1. M. Sano, Nonequilibrium Phase Transition in Shear Flow, International Conference on APEF2018 (Advances in Physics of Emergent Orders in Fluctuations), Nov. 15, 2018, Tokyo, Japan. (招待講演)
2. M. Sano, Nonequilibrium Phase Transition in Shear Flow, 10th Dynamics Days Asia Pacic, Nov. 4, 2018, Xiamen, China. (招待講演)
3. 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)
4. M. Sano, Transition to Turbulence and Nonequilibrium Phase Transition, ENS-UT Workshop (Nov. 15-16, 2017), Tokyo, Japan (招待講演)
5. M. Sano, Transition to Turbulence in Channel and Annular Flow, Workshop: Transition to Turbulence, Niels Bohr Institute (Oct. 23-25, 2017), Copenhagen, Denmark. (招待講演)
6. 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)
7. 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)
8. 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)

〔図書〕(計 2件)

1. 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
2. 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

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

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、研究者個人に帰属されます。