

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05799

研究課題名(和文) 液晶対流を用いた弱い乱流の輸送現象についての統計力学的研究

研究課題名(英文) Statistical Mechanical Study on Transport Phenomena of Weak Turbulence Using Nematic Electroconvection

研究代表者

日高 芳樹 (HIDAKA, Yoshiki)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：70274511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：電場を印加した液晶に生じる電気対流を実験対象として、対流と分子配向の相互作用によって起こる「弱い乱流」の示す輸送現象について、外力応答、相関関数、ブラウン運動などの統計力学的手法を用いて、その物理的性質を調べた。その結果、複数のモードの非線形相互作用による揺らぎであるため、これまで統計力学が対象としてきた熱的揺動とは異なる特有の性質が示された。また、局所的な秩序と大局的な無秩序が共存することを反映して、観測スケールによって輸送現象が定性的に変化することが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Physical properties of transport phenomenon of the weak turbulence in electroconvection of nematic liquid crystals have been studied. The weak turbulence occurs by the interaction between convective flow and nematic director. The statistical mechanical method such as external force response, correlation function, and Brownian motion were used to investigate the properties. As a result, the fluctuations due to the nonlinear interaction of multiple modes showed unique properties different from the thermal fluctuation targeted by the statistical mechanics so far. In addition, it was revealed that the transport phenomena change qualitatively depending on the observation scale, reflecting the coexistence of local order and global disorder in the weak turbulence.

研究分野：非線形物理学

キーワード：弱い乱流 ソフトモード乱流 欠陥乱流 非熱的揺動 カオス誘起摩擦 時間依存拡散係数 優拡散  
劣拡散

## 1. 研究開始当初の背景

2つの長時間モード間の弱い相互作用によって生じる「弱い乱流」は、強い非線形性によるエネルギーカスケード機構によって生じる「発達乱流」に比べて十分な研究がなされていない。弱い乱流は、小さな時空スケールでは層流的規則性をもちながら、大きなスケールで不規則性が現れる。発達乱流のコルモゴロフ則のように波数のべき乗で表される自己相似的階層性ではなく、大きなスケールと小さなスケールが分離され、物理的性質に定性的な違いが現れる。したがって、そのような秩序と無秩序が共存する弱い乱流の輸送現象の示す物理的性質の解明には、新たな視点が必要となる。

## 2. 研究の目的

このような「弱い乱流」の示す輸送現象の物理的性質を解明することが本研究の目的である。とくに、弱い乱流を「揺らぎ」と見なし、スケール依存性をもつ揺らぎの取り扱いを進展させてきた統計力学の観点から輸送現象をとらえる。

## 3. 研究の方法

実験対象として、弱い乱流が対流と分子配向の相互作用によって生じ、弱い乱流の実験系として多くの利点をもつ液晶電気対流を用いる。

輸送現象の観測手法としては、シャドウグラフ法による流れ構造の時間空間的測定（オイラー的観点）と、混入した微粒子の拡散（非熱的ブラウン運動）の観測（ラグランジュ的観点）を用いる。

液晶電気対流では、配向の違いによって対称性の異なる「プレーナー系」と「ホメオトロピック系」がある。これらは生じる乱流も異なるので、それぞれの系の輸送現象を調べ、対称性と輸送現象の関係を明らかにする。

また、液晶配向は磁場に応答するため、磁場を外力とする外力応答の手法も用いる。

## 4. 研究成果

### (1) ソフトモード乱流の交流磁場応答（論文で公表済み）

液晶電気対流において、南部-ゴールドストーン・モードである液晶配向と対流の相互作用によって生じる弱い乱流である「ソフトモード乱流」の動的性質を明らかにするために、その交流磁場応答を調べた。

ソフトモード乱流は対流ロールの向きに関する時空カオスであるが、磁場を印加すると南部-ゴールドストーン・モードの励起が抑えられるためロールの向きがそろう。そのそろう程度を定量化した秩序変数「パターン秩序度」の時間変化を測定し、交流磁場応答の複素感受率を得た。低周波数磁場に対する複素感受率はデバイ型緩和スペクトルによく合い、カオス誘起摩擦による緩和時間が得

られた。一方、高周波数ではデバイ型緩和から外れ、秩序変数の大きな揺らぎが生じた。

### (2) プレーナー系の弱い乱流の非熱的ブラウン運動（論文で公表済み）

プレーナー系の液晶電気対流に現れる2種類の弱い乱流「欠陥乱流（対流ロールの揺らぎ）」と「時空間欠性（秩序構造と乱流の共存）」について、非熱的ブラウン運動の手法を用いてラグランジュ的観点から統計的性質を明らかにした。

欠陥乱流では、粒子は1つのロールにトラップされ、ときどき隣のロールにホップした。そのホッピング頻度の制御パラメータ依存性からロール間の活性化エネルギーを得た。

時空間欠性では、秩序領域と乱流領域では拡散係数の値に大きな違いがある。したがって1つの粒子の拡散係数の時間変化は、間欠的に変化する2値時系列とみなし、持続時間分布を測定した。一方、空間の1点での状態の変化（オイラー的観点）も秩序と乱流の間で間欠的に変化するのので、持続時間分布を測定した。どちらの場合も秩序状態の持続時間はべき分布を示したが、べき指数が異なることがわかった。

### (3) 欠陥乱流の動的構造因子（論文で公表済み）

弱い乱流のカオス的移流の性質を明らかにするために、ネマチック液晶のプレーナー配向系における時空カオスの一種である欠陥乱流を実験的に研究した。

観測されるパターンの動的構造因子は、単純な指数緩和と弱い減衰振動の和によって表された。単純緩和は位相変調の結果として生じ、減衰振動は、局所領域における欠陥対のグライドによって生じることがわかった。また、各緩和が、乱流輸送を巨視的な寄与と揺らぎに分離する射影演算子法によって解析的に導かれた。その結果、欠陥乱流の非熱的揺動は2つの独立したマルコフ・プロセスに分離された。

### (4) ホメオトロピック系の中程度の乱流による拡散（論文で公表済み）

ホメオトロピック系の中程度の乱流によって駆動される微粒子の非熱的ブラウン運動を、拡散係数の粗視化時間依存性である「時間依存拡散係数」を用いて解析し、液晶乱流特有の乱流拡散について調べた。

その結果、ある時間範囲で劣拡散（sub-diffusion）が起こり、乱流中に微粒子をリバウンドさせる効果が含まれていることを示唆する結果が得られた。さらに、乱流構造の詳細な観察によって、乱流によって生じるネマチックディレクターの特徴的な線状構造によってリバウンドが引き起こされることを明らかにした。この劣拡散は、対流と南部-ゴールドストーン・モードとして振る舞うネマチックディレクターとの相互

作用から特異な非線形現象が生じるホメオトロピック系に特有な現象であることがわかった。

(5) 欠陥乱流の時間依存拡散係数 (論文投稿中)

プレーナー系の欠陥乱流による拡散の性質を詳細を明らかにするために、非熱的ブラウン運動の測定結果を、時間依存拡散係数によって解析した。

粗視化時間の小さい領域では、対流ロール内で粒子の運動が促進されるため、弾道的性質を表す優拡散 (super-diffusion) が見られた。中程度の領域では、粒子が対流ロールに閉じ込められているため劣拡散になり、長い時間領域では、(2)で明らかになったホップ拡散が支配的になるため、通常拡散になることがわかった。

弱い乱流では、上述のように小さな時空スケールでは層流的規則性をもちながら、大きなスケールで不規則性が現れる。そのことを反映して、粗視化時間によって拡散の性質が定性的に変わることがわかった。

(6) ソフトモード乱流における応答と揺らぎの比較 (論文準備中)

熱平衡系では、揺動散逸定理が成り立ち、外力応答と熱揺動の間に関係があることがわかっている。弱い乱流は、非平衡開放系における非熱的揺動と見なすことができるので、非平衡開放系における揺動散逸関係を検証するための実験研究を行なった。

具体的には、(1)で用いたパターン秩序度に対して、ステップ外力に対する応答を表す緩和関数と、揺動を表す自己相関関数の比較を行なった。その結果、両者は一致せず、揺動散逸定理が成り立たないことがわかった。また、その原因が、非熱的揺動が対流と液晶配向の非線形相互作用によるためであることを明らかにした。

(7) 南部-ゴールドストーン・モードが乱流拡散に与える影響 (研究継続中)

(5)では、プレーナー系の欠陥乱流において、中程度の時間で対流ロールの閉じ込め効果による劣拡散が現れることを明らかにしたが、ホメオトロピック系のソフトモード乱流では劣拡散が現れず、優拡散が現れることが以前から知られていた。欠陥乱流と同様に局所的な対流ロールが存在するのになぜ劣拡散が現れないのか、その原因を明らかにした。

観察の結果、ソフトモード乱流では、粒子は対流ロールにトラップされたまま対流ロールが弾道的な運動をするため、劣拡散ではなく優拡散が現れることがわかった。また、磁場を印加することによって南部-ゴールドストーン・モードを抑えると、対流ロールの弾道的な運動が抑えられ、優拡散が劣拡散に転移することがわかった。そのため、対流口

ールの弾頭的な運動が、南部-ゴールドストーン・モードに由来することが示唆された。

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 7 件)

Y. Hidaka, K. Ijigawa, S.-Y. Kwak, N. Oikawa, H. Okabe, and K. Hara: "Information Reduction for Chaotic Patterns" (査読有) Forma, in print (2018)

K. Maeda, T. Narumi, R. Anugraha, H. Okabe, K. Hara, and Y. Hidaka: "Sub-Diffusion in Electroconvective Turbulence of Homeotropic Nematic Liquid Crystals" (査読有) Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 87, pp. 014401-1-5 (2018) DOI: 10.7566/JPSJ.87.014401

T. Narumi, Y. Mikami, T. Nagaya, H. Okabe, K. Hara, and Y. Hidaka: "Relaxation with long-period oscillation in defect turbulence of planar nematic liquid crystals" (査読有) Physical Review E, Vol. 94, pp. 042701-1-6 (2016) DOI: 10.1103/PhysRevE.94.042701

T. Nagaya, Y. Satou, Y. Goto, Y. Hidaka, and H. Orihara: "Viscosity of Liquid Crystal Mixtures in the Presence of Electroconvection" (査読有) Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 85, pp. 074002-1-4 (2016) DOI: 10.7566/JPSJ.85.074002

Y. Hidaka, M. Hashiguchi, N. Oikawa, and S. Kai: "Lagrangian chaos and particle diffusion in electroconvection of planar nematic liquid crystals" (査読有) Physical Review E, Vol. 92, pp. 032909-1-6 (2015) DOI: 10.1103/PhysRevE.92.032909

Y. Hidaka and S. Kai: "Dissipative Structures in Liquid Crystals" (査読有) Forma, Vol. 30, pp. S67-S69 (2015) DOI: 10.5047/forma.2015.s010

M. Iino, Y. Hidaka, F. Nugroho, R. Anugraha, H. Okabe, and K. Hara: "Responses of spatiotemporal chaos to oscillating forces" (査読有) Physical Review E, Vol. 92, pp. 012916-1-5 (2015)

〔学会発表〕(計 25 件)

児島亮平, 岡部弘高, 河野真也, 原一広, 日高芳樹: “光重合を用いた液晶の非平衡構造を保持したゲルの作製”  
第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017 年

山中一真, 岡部弘高, 河野真也, 原一広, 日高芳樹: “液晶電気対流の欠陥乱流における異常拡散”  
第 123 回日本物理学会九州支部例会, 2017 年

Y. Hidaka, K. Maeda, T. Narumi, H. Okabe, and K. Hara: “Transition Between Super-diffusion and Sub-diffusion in Weak Turbulence of Nematic Electroconvection”  
International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, 2017 年

日高芳樹, 前田和也, 鳴海孝之, 河野真也, 岡部弘高, 原一広: “液晶配向の Nambu-Goldstone モードが乱流拡散に与える影響”  
2017 年日本液晶学会討論会, 2017 年

井路側晃輔, 河野真也, 岡部弘高, 原一広, 日高芳樹: “液晶散逸構造の揺らぎと外力応答の関係”  
日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年

T. Narumi, J. Yoshitani, Y. Mikami, H. Okabe, K. Hara, and Y. Hidaka: “Transport Phenomena of Spatiotemporal Chaos in Electroconvective Systems of Nematic Liquid Crystal”  
8th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems, 2017 年

Y. Hidaka, K. Maeda, T. Narumi, H. Okabe, and K. Hara: “Chaotic Advection in Weak Turbulence of Nematic Electroconvection”  
ゆらぎと構造の協奏 第 4 回領域研究会 A02 班会議, 2017 年

井路側晃輔, 河野真也, 岡部弘高, 原一広, 日高芳樹: “散逸構造の非線形揺動と外力応答の関係”  
西日本非線形研究会 2017, 2017 年

児島亮平, 岡部弘高, 河野真也, 原一広, 日高芳樹: “光重合を用いた液晶中の電場誘起非線形構造の固定化の研究”  
西日本非線形研究会 2017, 2017 年

児島亮平, 岡部弘高, 河野真也, 原一広, 日高芳樹: “光重合を用いた液晶の電場誘起

パターンの固定化の研究”  
第 122 回日本物理学会九州支部例会, 2016 年

Kwak Seungyong, 岡部弘高, 河野真也, 原一広, 日高芳樹: “トポロジカル欠陥をもつ弱い乱流の位相記述による研究”  
第 122 回日本物理学会九州支部例会, 2016 年

日高芳樹, 前田和也, 鳴海孝之, Rinto Anugraha, 河野真也, 岡部弘高, 原一広: “液晶乱流中の特異構造による Sub-diffusion”  
2016 年日本液晶学会討論会, 2016 年

前田和也, 井路側晃輔, 河野真也, 岡部弘高, 原一広, 日高芳樹: “Nambu-Goldstone モードが乱流拡散に与える影響”  
日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年

井路側晃輔, 前田和也, 河野真也, 岡部弘高, 原一広, 日高芳樹: “局所波数ベクトル場を用いた対流構造の揺動と外力応答の研究”  
日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年

Y. Hidaka, N. Oikawa, K. Ijigawa, H. Okabe, and K. Hara: “Information Reduction for Chaotic Patterns”  
The 11th International Conference on Computer Science & Education (IEEE ICCSE 2016) Satellite Event in Fukui, 2016 年

T. Narumi, J. Yoshitani, Y. Mikami, H. Okabe, K. Hara, and Y. Hidaka: “Statistical-Physical Analyses for Transport Phenomena of Spatiotemporal Chaos in Electroconvective Systems of Nematic Liquid Crystals”  
8th Japanese-Italian Liquid Crystal Workshop (JILCW2016), 2016 年

日高芳樹: “環境ミメティクスとしての液晶電気対流”  
西日本非線形研究会 2016 -環境と非線形科学-, 2016 年

前田和也, 井路側晃輔, 河野真也, 岡部弘高, 原一広, 日高芳樹: “Nambu-Goldstone モードが乱流拡散に与える影響”  
西日本非線形研究会 2016 -環境と非線形科学-, 2016 年

井路側晃輔, 前田和也, 河野真也, 岡部弘高, 原一広, 日高芳樹: “液晶電気対流における非線形揺動と外力応答の局所特性”  
西日本非線形研究会 2016 -環境と非線形科学-, 2016 年

鳴海孝之, 三上洋輔, 長屋智之, 岡部弘高, 原一広, 日高芳樹: “欠陥乱流の輸送特性に

関する統計物理学の解析”  
西日本非線形研究会 2016 -環境と非線形科学  
-, 2016 年

⑳ 日高芳樹, 前田和也, 永岡賢一, 吉村信次,  
寺坂健一郎, 岡部弘高, 原一広: “液晶電気対  
流による乱流の構造と輸送現象についての  
研究”  
2015 年日本液晶学会討論会, 2015 年

㉑ 日高芳樹, 飯野美里, Fahrudin Nugroho,  
Rinto Anugraha, 岡部弘高, 原一広: “液晶散  
逸構造の交流磁場応答”  
2015 年日本液晶学会討論会, 2015 年

㉒ 小林史明, 佐々木裕司, 日高芳樹, 長屋智  
之, 折原宏: “液晶電気対流のしきい値近傍に  
おける配向ゆらぎの観察”  
2015 年日本液晶学会討論会, 2015 年

㉓ 前田和也, 日高芳樹, 鳴海孝之, 岡部弘孝,  
原一広: “液晶対流における中程度の乱流によ  
る Sub-diffusion”  
日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年

㉔ 前田和也, 日高芳樹, 鳴海孝之, 原一広,  
岡部弘高: “液晶対流の非線形揺らぎによる非  
熱的拡散”  
非線形反応と協同現象研究会西日本支部,  
2015 年

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

日高 芳樹 (HIDAKA, Yoshiki )  
九州大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号 : 70274511

### (3) 連携研究者

鳴海 孝之 (NARUMI, Takayuki )  
山口大学・大学院創成科学研究科・講師  
研究者番号 : 50599644