

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14593

研究課題名(和文)弱い乱流の粘性と拡散 - 液晶電気対流系の非平衡統計力学的研究 -

研究課題名(英文) Statistical physics for viscosity and diffusion of weak turbulence in electro-convection systems

研究代表者

鳴海 孝之 (Narumi, Takayuki)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：50599644

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：液晶電気対流系に関する弱い乱流 - ソフトモード乱流、欠陥乱流、Nikolaevskii乱流 - についての物性を明らかにした上で、それらの間の関係解明を目指した。特に弱い乱流中を運動する粒子運動のダイナミクスを、実験と数値シミュレーションにより研究し、発達乱流には見られない現象である異常拡散現象に焦点を当てて解析した。その結果、個々の弱い乱流が有する性質に起因するものだけでなく、液晶電気対流系に関する弱い乱流に統一的に見出される性質として階層構造の重要性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、弱い乱流の物性を明らかにするために、液晶電気対流系に関する弱い乱流に焦点を当てた。液晶電気対流系に現れる種々の弱い乱流を、非平衡統計力学的手法および計算機シミュレーションにより研究することで、液晶電気対流系の弱い乱流に共通する性質から普遍性解明に向けた知見を得た。本研究は、工学的には、弱い乱流を応用するための基礎的な知見となりうる。例えば、エネルギー散逸が抑えられた省エネルギーな状況での効率的な混合を、発達乱流とは異なる方法で実現する可能性につながるものと期待される。

研究成果の概要(英文)：We aimed to clarify the physical properties of soft-mode turbulence, defect turbulence, and Nikolaevskii turbulence, which are weak turbulence for electroconvective systems in nematic liquid crystals. Furthermore, we tried to reveal the relationship between them. The tagged-particle dynamics in the turbulent flow was studied by experiments and numerical simulations from the viewpoint of the anomalous diffusion, which is a phenomenon not seen in the fully-developed turbulence. As a result, the importance of the hierarchical structure was clarified not only due to the properties of individual weak turbulence but also as properties that are universally found in weak turbulence for electroconvective systems.

研究分野：非線形非平衡物理，乱流，計算物理，統計物理

キーワード：液晶電気対流 Nikolaevskii乱流 異常拡散 粒子シミュレーション 階層構造 ラグランジュ描像

## 1. 研究開始当初の背景

乱流は自然界での基本現象であり、様々なスケールで現れる。身の回りの多くの流れが乱流なので、乱流の制御は工学的に極めて重要な課題である。これまでは、レイノルズ数が非常に大きい流れである発達乱流が主な研究対象であった。しかし近年は、微細環境下での乱流や、バクテリアといったアクティブマターの乱流が注目されている。これらは、特性長が短いため、小さいレイノルズ数で生じる乱流である。本研究で対象とした、弱い乱流と総称される乱流も、低レイノルズ数で現れる乱流の一種である。弱い乱流は、高波数領域に層流的な構造が存在する乱流として特徴付けられ、人工系や大気などの工学的対象で多く見られる。例えば、熱対流系では大きな温度差により発達乱流が生じるが、対流発生分岐点近傍の弱い乱流では、系全体では乱れているが小さなスケールに対流構造が残る。層流的構造により、弱い乱流の物性は発達乱流のそれとは定性的に異なる。そのため、新しい観点での研究が必要とされていた。

乱流の統計的法則は、非平衡統計力学により研究されてきた。非平衡統計力学は、系の緩和といった巨視的性質を微視的な乱れの性質から理解することを目指す学問である。発達乱流では、巨視的スケールと乱れのスケールを分離するために理論的に扱いやすく、微視的性質である粘性と巨視的性質である拡散を結びつける揺動散逸関係が成立する。一方、弱い乱流では、層流的構造により乱れを白色雑音とはみなせず、統計的法則の整備は進んでいない。しかし近年では、白色雑音ではない乱れ全般に関する研究機運が高まっており、弱い乱流の緩和を理解するための解析手法も提案されている。しかし、その解析手法を実現現象へ適用した例は、本研究を開始した当初は代表者らによる研究より以前はなかった。

研究代表者は、液晶電気対流系に現れる弱い乱流を研究してきた。液晶はディスプレイとしての応用が知られているが、そこでは電場の印加により液晶分子の向きが揃う性質を利用している。この性質により、液晶系で実験条件を適切に設定すると、電場で制御される対流である電気対流が生じる。電場は温度場に比べて応答性が良いので、電気対流系は対流および乱流の基礎研究に適している。我々は、液晶電気対流系に現れる弱い乱流の一種であるソフトモード乱流において、緩和の二重構造を実現現象で初めて捉え、粘性の観点からその機構を解明した。これは、決定論的な緩和から確率論的な緩和への、巨視的な時間スケールでの遷移を表しており、発達乱流には決して見られない。他にも、ガラス状態とソフトモード乱流の類似性に注目してソフトモード乱流の研究を進めてきた。また、液晶電気対流系に現れる別の弱い乱流である欠陥乱流についても、その緩和特性を解明していた。

## 2. 研究の目的

本研究では、液晶電気対流系に現れる弱い乱流の、粘性と拡散に関する物性解明を目指した。乱流は、見かけ上の粘性の増大や、物質の拡散・混合の促進といった特性を有する。発達乱流では粘性として乱流粘性が、拡散として乱れた流れの移流効果が、それぞれ広く研究されてきた。一方、弱い乱流での粘性や拡散については解明すべき点が多い。弱い乱流の種類に応じて層流的構造が様々であることが、普遍的解明を妨げている。その点、液晶電気対流系での弱い乱流では、ソフトモード乱流と欠陥乱流とで乱れの様相は全く異なるものの、層流的構造は対流ロールで共通している。このことから、弱い乱流での粘性と拡散の間の普遍的性質解明には、液晶電気対流系をまず研究すべきと考えた。

## 3. 研究の方法

(1) 弱い乱流に駆動される拡散を実験的に調べるため、ソフトモード乱流および欠陥乱流をLagrange 描像で研究した。具体的には、弱い乱流に蛍光粒子を混入し、その粒子運動を顕微鏡により観測することで、粒子ダイナミクスから拡散特性を抽出した。本研究に先立って行った研究では、この手法によりソフトモード乱流内の対流構造を調べていた。本研究ではその知見を活用することで、ソフトモード乱流と欠陥乱流について、大規模な制御変数領域で粒子位置の観測を進めた。

(2) 弱い乱流に駆動される拡散を理論的に理解するため、Nikolaevskii 方程式を研究した。制御変数を適切に設定することで、ソフトモード乱流と発生機構が同じ弱い乱流である Nikolaevskii 乱流が解として現れる。そこで、弱い乱流による粒子拡散を理解するために、Nikolaevskii 乱流中の粒子の拡散を研究した。粒子の運動は、ブラウン動力学シミュレーションにより再現した。ブラウン動力学シミュレーションでの粒子位置の時間発展と同時に Nikolaevskii 方程式を解き、Nikolaevskii 乱流の情報を粒子ダイナミクスに時々刻々反映させた。

#### 4. 研究成果

(1) ホメオトロピック配向でのネマティック液晶系に対して、電気対流乱流による拡散の統計的性質を、乱流によって駆動されるタグ粒子のダイナミクスを測定することによって明らかにした。時間依存拡散係数の指数を解析することで、特定の時間領域で劣拡散現象が発生することを示した。さらに、この劣拡散現象は、液晶内に生じる線状構造（図1の矢印）に対する粒子の跳ね返り運動によって引き起こされることを明らかにした。一般的に弱い乱流では劣拡散が観測されないことを踏まえると、強く乱れた流れと分子配向の相互作用により線状構造が形成され、それが劣拡散現象を引き起こしたものと考えられる。これらの結果から、液晶中の乱流拡散は、乱流との相互作用により誘起されるネマチック配向の構造に影響されることが明らかになった。

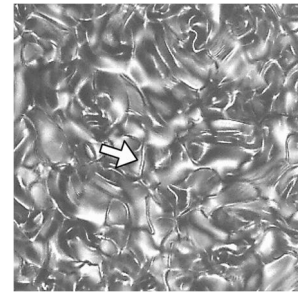


図1 電気対流乱流

(2) 欠陥乱流から生じるカオス的移流の特性を、タグ粒子の運動を画像解析することで得られる時間依存拡散係数を調べることにより明らかにした。特に、観測時間スケールに依存する拡散特性が階層的に変化することを見出した。具体的には、粗視化時間が増加するにつれて、拡散は、(a)超拡散 (b)劣拡散 (c)通常拡散と変化する（図2）。この結果は、欠陥乱流における局所秩序と全体的無秩序の共存を反映したものであり、弱い乱流全般に見られる普遍性の一つの候補と考えられる。

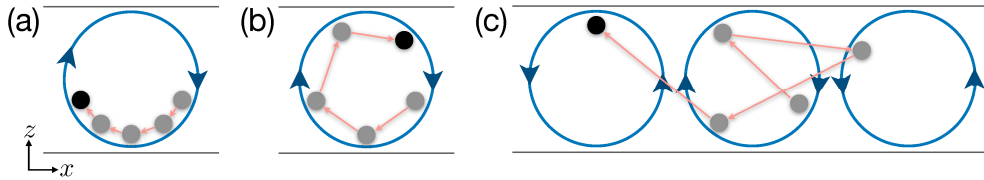


図2 時間スケールごとの粒子ダイナミクスの模式図

(3) ネマティック液晶による電気対流系で実験的に観測されたソフトモード乱流の数学モデルである1次元 Nikolaevskii 乱流を理論的に研究した。ラグランジュ描像から動的特性を理解するため、対流構造を仮定することによって得られる速度場を考え、Nikolaevskii 乱流のタグ付き粒子ダイナミクスを数値的に測定した。タグ粒子は乱流により拡散し、超拡散現象を示した。拡散の異常性を示す異常パラメータを見ると、中間的な時間スケールで極大値がある（図3）。さらに、べき乗則によって特徴付けられる遅い拡散現象を見出した。これは、構造の拡散特性がスケール不変であることを示唆している。

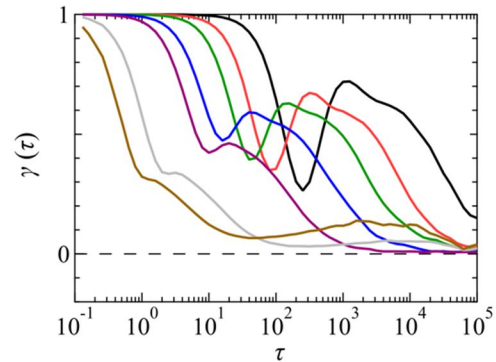


図3 異常パラメータ ( )

(4) Nikolaevskii 乱流中のタグ粒子に見られる遅い拡散の特性を理解するため、2スケールブラウン運動（2SBM）と呼ぶモデルを提案した。2SBMでの粒子は、速い乱流変動と遅い拡散構造による移流という二つのメカニズムによって運動すると想定されている。2SBMにより中間時間スケールの極大値が記述できた（図4）。このことは、Nikolaevskii 乱流における階層構造の存在を示唆している。さらに、拡散係数の指数依存性を比較することにより2SBMの有効性が定量的に検証された。このような非局所構造は実験的および理論的に弱い乱流で観察されているため、遅い拡散構造のべき特性は弱い乱流の普遍性を理解するのに役立つ、乱れた状態への遷移の理解につながる可能性がある。

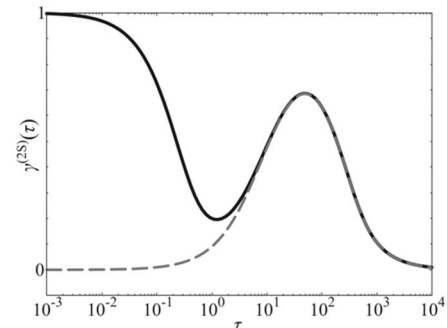


図4 理論モデルによる ( )

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Narumi Takayuki, Hidaka Yoshiki	4. 巻 -
2. 論文標題 Tagged-Particle Dynamics in Weak Turbulence: System Size Dependence of Nikolaevskii Turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
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 Narumi Takayuki, Hidaka Yoshiki	4. 巻 101
2. 論文標題 Slow diffusive structure in Nikolaevskii turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 22202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.101.022202	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 Yamanaka Kazuma, Narumi Takayuki, Hashiguchi Megumi, Okabe Hirotaka, Hara Kazuhiro, Hidaka Yoshiki	4. 巻 3
2. 論文標題 Time-Dependent Diffusion Coefficients for Chaotic Advection due to Fluctuations of Convective Rolls	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fluids	6. 最初と最後の頁 99 ~ 99
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/fluids3040099	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 Kazuya Maeda, Takayuki Narumi, Rinto Anugraha, Hirotaka Okabe, Kazuhiro Hara, Yoshiki Hidaka	4. 巻 87
2. 論文標題 Sub-Diffusion in Electroconvective Turbulence of Homeotropic Nematic Liquid Crystals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 014401-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.87.014401	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13件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 鳴海孝之
2. 発表標題 Nikolaevskii 乱流での非局所構造
3. 学会等名 西日本非線形科学研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Narumi Takayuki
2. 発表標題 Tagged-particle dynamics in weak turbulence - size-dependence for Nikolaevskii turbulence
3. 学会等名 17th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Narumi Takayuki
2. 発表標題 Tagged-particle dynamics in Nikolaevskii turbulence
3. 学会等名 International Mathematical Science Workshop in Yamaguchi 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鳴海 孝之, 井上 俊樹, 小田 和幸, 日高 芳樹
2. 発表標題 Nikolaevskii 乱流での粒子運動
3. 学会等名 西日本非線形研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Narumi, Yoshiki Hidaka
2. 発表標題 Relaxation and Transport of Spatiotemporal Chaos in a Homeotropic System of Nematic Liquid Crystals
3. 学会等名 27th International Liquid Crystal Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳴海 孝之, 日高 芳樹
2. 発表標題 弱い乱流中での粒子拡散 - Nikolaevskii 方程式による理論研究
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Narumi, Yoshiki Hidaka
2. 発表標題 Anomalous diffusion in soft-mode turbulence
3. 学会等名 International Conference on APEF2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳴海 孝之, 日高 芳樹
2. 発表標題 Nikolaevskii乱流での異常拡散
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiki Hidaka, Kazuya Maeda, Takayuki Narumi, Hirotaka Okabe, Kazuhiro Hara
2. 発表標題 Chaotic Advection in Weak Turbulence of Nematic Electroconvection
3. 学会等名 The 4th Research Area Meeting of "Synergy of Fluctuation and Structure" (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takayuki Narumi, Junichi Yoshitani, Yosuke Mikami, Hirotaka Okabe, Kazuhiro Hara, Yoshiki Hidaka
2. 発表標題 Transport Phenomena of Spatiotemporal Chaos in Electroconvective Systems of Nematic Liquid Crystal
3. 学会等名 8th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 日高 芳樹, 前田 和也, 鳴海 孝之, 河野 真也, 岡部 弘高, 原 一広
2. 発表標題 液晶配向のNambu-Goldstoneモードが乱流拡散に与える影響
3. 学会等名 2017年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鳴海孝之
2. 発表標題 非たたみこみ型モード結合理論による短距離引力コロイドの解析
3. 学会等名 第7回計算統計物理学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiki Hidaka, Kazuyuki Maeda, Takayuki Narumi, Hirotaka Okabe, Kazuhiro Hara
2. 発表標題 Transition between Super-diffusion and Sub-diffusion in Weak Turbulence of Nematic Electroconvection
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

山口大学 鳴海研究室のウェブサイト <a href="http://web.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~tnarumi/index.html">http://web.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~tnarumi/index.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