

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月20日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21340110

研究課題名（和文） 液晶におけるパターン形成の解明 -非平衡揺動定理と時空カオス-

研究課題名（英文） Elucidation for Pattern Formation in Liquid Crystals -Nonequilibrium Fluctuation Theorem and Spatiotemporal Chaos-

研究代表者

甲斐 昌一 (KAI SHOICHI)

九州大学・大学院工学研究院・特命教授

研究者番号：20112295

研究成果の概要（和文）：

散逸構造によって系の性質がどのように変化したかを知るための統計物理学の構築を目指して、ソフトモード乱流や欠陥乱流などの時空カオスを呈する液晶電気対流を対象とし、散逸構造の揺動を統計力学的な観点から研究した。時空カオスはローカルな秩序構造とグローバルな無秩序構造という階層的な二重構造をもつが、拡散現象やパターンの揺らぎの時間相関関数の測定によって、統計力学的性質においても時空スケールによって変化する二重構造をもつことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

In order to establish the statistical physics for dissipative structures, fluctuations of spatiotemporal chaos in electroconvective systems of nematic liquid crystals were investigated from the statisticalmechanical viewpoint. Spatiotemporal chaos has stratified dual structures which consist of local ordered structures and global disordered ones. By the measurements of diffusion phenomena and temporal correlation function for pattern fluctuations, it was clarified that spatiotemporal chaos shows dual structures in the spatiotemporal scale change also in the statisticalmechanical properties.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2012年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：分科) 数理物理・物性基礎 細目) 非平衡・非線形物理学

キーワード：非線形物理学・非平衡統計物理学・自己組織化・物性基礎論

1. 研究開始当初の背景

エネルギーや物質を外部環境から取り込み、それを散逸することによって動的な安定

が維持されている系を非平衡開放系と呼び、非平衡開放系において自己組織化されたマクロな秩序を散逸構造と呼ぶ。流体を下から

熱した時に生じる Rayleigh-Bénard(RB)対流系は、最初の分岐点で空間秩序構造が現れる非平衡散逸系の代表例として盛んに研究が行われてきた。一方、液晶に電場を加えた系でも同様の対流現象が発生し、電気対流と呼ばれている。液晶電気対流はRB対流に比べて発生機構は複雑だが、ミクロな発生機構によらない散逸構造の普遍性を非線形物理学の観点から探求するためには、逆に有利な点の多い研究対象で、近年はRB対流を上回る活発さで研究が行われている。

液晶電気対流系には2つの異なったタイプがある。一つは液晶分子の初期配向が印加電場に対して垂直で連続回転対称性が強制的に破れているプレーナー配向系で、初期配向から対流不安定性によってストライプ状の対流周期構造が現れ、その後、逐次的にいくつかの構造を経て乱流にまで発展する。液晶電気対流を研究対象とした非平衡開放系のパターン形成の初期の研究においては、プレーナー系が盛んに研究され、「格子状対流(グリッドパターン)と時空間欠性」、「欠陥乱流」、「乱流-乱流転移」などの多くの新奇現象が発見されてきた。

もう一つは初期配向は電場に平行で連続回転対称性を有しているホメオトロピック配向系で、初期配向からFréedericksz配向転移を経て対流不安定を起こす。Fréedericksz転移に伴う連続回転対称性の自発的破れによってNambu-Goldstone(NG)モードをもつが、NGモードの励起エネルギーがゼロであるため、対流モードとの非線形相互作用によって静止状態から直接乱流(時空カオス)に移移する。この時空カオスは研究代表者らによって見いだされ、ソフトモード乱流(SMT)と名付けられている。

2. 研究の目的

これまでの非平衡開放系・散逸構造の研究は、マクロ秩序変数により、非線形動力学の観点から分岐や構造形成の解明を中心に行われてきた。さらに一歩踏み込んで、散逸構造が生まれたことによって系の「性質・機能(拡張された物性)」がどのように変化したかという熱統計物理学的観点からの研究が必要になる。これまで「揺動散逸定理」等で知られるように平衡系近傍では熱揺らぎが多様な物性の出現に主役を演じたが、非平衡開放系では熱揺動に代わる非熱的なマクロ非線形揺動(時空カオス)が系の性質を決定する重要な役割を演じる。そこで本研究では、これまでのパターン形成の物理で得られた成果を一歩進めて「散逸構造の統計物理」の構築を目指す。具体的には、ソフトモード乱流をはじめとした多様な時空カオスを呈する液晶電気対流を対象とし、マクロパターンの揺動とそれに基づく輸送現象などを統計力

学的な観点から研究し、非平衡開放系における揺動と物理的性質の間の普遍的原理を確立することを目的とする。

統計物理学で知られているように、物理系には物質の運動の揺らぎ(輸送係数)と構造揺らぎ(場の揺らぎ)が存在し、それぞれが異なったタイプの物性を生み出す。そこで本研究でも、マクロなパターンの揺らぎの性質とそれが生み出す新しい輸送係数に注目する。これまで散逸構造の研究では、上述のようにパターンのダイナミクス(Euler的観点)が非線形力学の観点から調べられてきた。したがってまず、そのようなパターン・ダイナミクスを揺らぎという観点から統計物理学的に再検討する。一方、Lagrange的観点に立つ粒子(物質)運動の揺らぎはほとんど注目されてこなかった。そこでのマクロかつ非線形である散逸構造の揺らぎの性質を明らかにし、その揺らぎを駆動力とする輸送現象との関係から、散逸構造の統計物理を考察する。

3. 研究の方法

(1) 対象となる時空カオス

① ホメオトロピック系のソフトモード乱流(SMT)

上述のように、SMTは液晶配向のNGモードと電気対流モードの非線形相互作用によって生じる。SMTは対流発生と同時に生じるという特徴をもつため、非線形性が弱い領域でも発生し、線形安定状態と超臨界分岐を通して連続的につながる。したがって散逸構造の統計物理を考えるにあたって、これまでに確立されてきた統計物理とのアナロジーを取り込み易く、基本的性質についてイメージをつかみ易い現象である。

② プレーナー系の欠陥乱流

プレーナー系では、制御パラメータ(印加電圧)を上げるとストライプパターンが不安定化し、長波長の揺らぎが生じる。この揺らぎは、欠陥の不規則な発生・運動・消滅を導くため、欠陥乱流とよばれる。

③ プレーナー系の時空間欠性

欠陥乱流から印加電圧をさらに上げるとグリッドパターンが島状に現れる。この状態は、秩序状態と無秩序(乱流)状態が、時間的空間的に不規則に変動しながら共存しているため、時空間欠性とよばれる。

(2) 観測手法

① Euler的観点

液晶電気対流が、液晶の光学的性質によって対流構造の観測が容易であることを生かして、時空カオスを2次元の画像の時間変化として観測する。

② Lagrange的観点

液晶に微粒子を混入すると、時空カオスの揺らぎによって微粒子が拡散する。本研究では特に、単独微粒子の運動を追う、「非熱的

Brown 運動」の観測を行った。

時空カオスは、局所的には秩序構造を保ちつつ長波長の揺らぎが生じている状態なので、スケールによりその統計力学的性質が変化すると考えられる。そこで、波数空間や粗視化スケールを導入した解析を重要視した。

4. 研究成果

(1) Euler 的観点

時空カオスのパターン・ダイナミクスについて、次のような成果が得られた。

① SMT の時間相関関数

SMT の空間平均された時間相関関数は、初期の研究では単純な指数減衰であると考えられたが、詳細な解析によりガラス物質で見られるのと同様の Kohlrausch-Williams-Watts (KWW) 型減衰 (引き伸ばされた指数減衰) を示すことがわかった。また、制御パラメータを上げていくと KWW 型減衰から指数減衰へ遷移することがわかった。

空間 Fourier 係数の時間相関関数を求める動的画像解析法によって、SMT の時空揺動の統計力学的性質を調べた。その結果、SMT の相関関数が、力学的コヒーレンスを反映した短時間の代数型減衰と、確率的ふるまいに対応する長時間の指数型減衰の二重構造をもつことが明らかとなった (図 1)。さらに、空間 Fourier 係数が一般化 Langevin 方程式に従うと考え、時間相関関数の実験データから記憶関数を求める手法を確立した。代数型減衰と指数型減衰の境界が、記憶関数の減衰時間とほぼ対応することを明らかにした。また、記憶関数の減衰時間は、SMT に特徴的な長距離構造に相当する波数でピークを示すことを明らかにした。

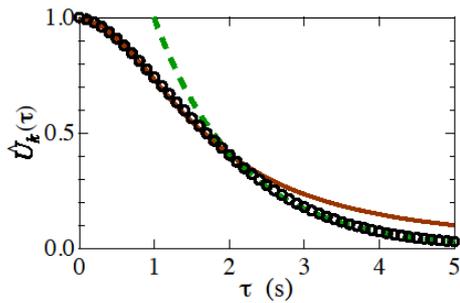


図 1. SMT の時間相関関数における二重構造

② SMT の磁場応答

SMT に対して磁場を印加すると、液晶が磁化率異方性をもつので、NG モードが抑えられ対流パターンは秩序化する。その秩序(磁場応答)は 2 次元 XY モデルの磁化を参考にした「パターン秩序度」によって定量的に表される。まず、ステップ状に磁場を除去することによって、パターン秩序度が有限の値をもつ状態から、パターン秩序度ゼロの SMT へ向かって緩和していく過程を観測した。その

結果、パターン秩序度は 2 段階の緩和を示すことがわかった (図 2)。第 1 段階では、ジグザグ不安定モードの発生によってパターン秩序度は急激に減衰した。また第 2 段階では、NG モードの効果によってゆっくりと緩和した。

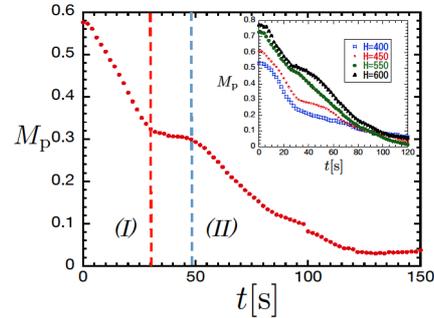


図 2. 磁場除去後のパターンの無秩序化

逆にステップ状に磁場を印加する場合は、SMT から秩序パターンが観測される。この場合、完全な秩序化まで数 1000 秒という非常に長い時間を要すること、制御過程が 3 領域に分けられることがわかった。また、その過程に「ブラックライン」とよばれる液晶配向の線状欠陥の存在が大きく関与しており、第 1 の領域ではブラックラインの線密度が急激に増加し、第 2、第 3 の領域では徐々に減少していくことがわかった。

③ プレーナー系の欠陥乱流

欠陥乱流をストライプの位相の時空変化としてとらえ、位相の時間相関関数を用いて揺らぎの性質を明らかにした。位相は 0 から 2π の範囲で変化するので一種の 2 次元 XY 系をなすが、熱揺動によって欠陥を生じる統計力学の 2 次元 XY モデルと異なり、時間の自己相関関数は振動成分を示すことがわかった。これは、欠陥乱流の揺らぎを生じる局所的なダイナミクスが、対流と液晶配向の相互作用による Hopf 不安定性であることを反映しているものと考えられる。

(2) Lagrange 的観点

① SMT の非熱的 Brown 運動

SMT の非熱的 Brown 運動を詳細に観察した結果、微粒子は速い運動と遅い運動を間欠的に繰り返す、それぞれの運動が、対流ロール内・ロール間の運動と、SMT の空間パターンの特徴であるパッチ構造がグローバルに変化する運動に対応することがわかった。また、粗視化時間依存の拡散係数を用いた解析により、短い時間スケールでは対流内の循環運動に対応する力学的運動、中間的な時間スケールでは SMT のパッチ構造を反映した異常拡散、長時間スケールではパッチ間のランダムウォークによる正常拡散と、観測時間スケールによってその運動が変化することがわかった。

② 欠陥乱流の非熱的 Brown 運動

欠陥乱流の非熱的 Brown 運動を観測した結果、あるロール内の循環運動をしばらくした後、隣のロールに移るホッピング拡散を示すことがわかった。単位時間当たりのホッピング率を制御パラメータ(規格化 2 乗電圧)を変えながら求めることにより、制御パラメータを単位とした活性化エネルギーを得た。

③ 時空間欠性の非熱的 Brown 運動

時空間欠性に対しても非熱的 Brown 運動の観測を行った(図 3)。微粒子が秩序領域にいるときに比べて乱流領域にいる場合の拡散係数が大きいため、拡散係数場が時空間欠的に変化していることがわかった。時間変化する拡散係数に相当する物理量の導入により、粒子が秩序領域に居続ける持続時間の分布を調べた。その結果、通常の Poisson 過程と異なりべき分布を示すことがわかった。一方、パターンの観測による Euler 的観点の測定によっても、秩序状態の持続時間はべき分布を示した。ただし、秩序領域での拡散が遅いことを反映し、そのべき指数は Lagrange 的観点の方が小さくなることがわかった。

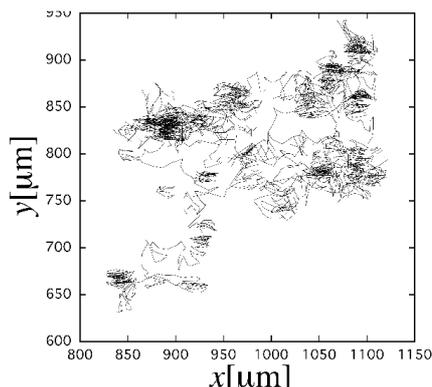


図 3. 時空間欠性における微粒子の軌跡

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 26 件)

- ① T. NARUMI, J. YOSHITANI, M. SUZUKI, Y. HIDAKA, F. NUGROHO, T. NAGAYA, S. KAI, Memory Function of Turbulent Fluctuations in Soft-mode Turbulence, Physical Review E, Vol. 87, pp. 012505-1-8, 2013, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevE.87.012505
- ② F. NUGROHO, Y. HIDAKA, T. UEKI, S. KAI, Transient Mode Selections in Soft-mode Turbulence by Controlling the Nambu-Goldstone Modes, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 81, No. pp. 024004-1-5, 2012, 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.81.024004

- ③ F. NUGROHO, T. NARUMI, Y. HIDAKA, J. YOSHITANI, M. SUZUKI, S. KAI, Glassy Dynamics in Relaxation of Soft-mode Turbulence, Physical Review E, Vol. 85, pp.030701(R)-1-5, 2012, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevE.85.030701
- ④ R. ANUGRAHA, F. NUGROHO, T. UEKI, Y. HIDAKA, S. KAI, M. I. TRIBELSKY, Link of Microscopic and Macroscopic Fields in Nematodynamics, Physical Review E, Vol. 83, pp. 022701-1-4, 2011, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevE.83.022701
- ⑤ F. NUGROHO, T. UEKI, R. ANUGRAHA, Y. HIDAKA, S. KAI, Quantitative Definition of Patterns in Soft-mode Turbulence Suppressing the Nambu-Goldstone Mode, Physical Review E, Vol. 84, pp. 011709-1-5, 2011, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevE.84.011709
- ⑥ Y. HIDAKA, Y. HOSOKAWA, N. OIKAWA, K. TAMURA, R. ANUGRAHA, S. KAI, A Nonequilibrium Temperature and Fluctuation Theorem for Soft-mode Turbulence, Physica D, Vol. 239, pp. 735-738, 2010, 査読有, DOI:10.1016/j.physd.2009.07.003
- ⑦ F. NUGROHO, T. UEKI, R. ANUGRAHA, Y. HIDAKA, S. KAI, Magnetic Field Dependence of Spatiotemporal Chaos in a Homeotropic Nematic System, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 79, No. 12, pp. 123001-1-4, 2010, 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.79.123001
- ⑧ J. H. HUH, A. KURIBAYASHI, S. KAI, Noise-controlled Pattern Formation and Threshold Shift for Electroconvection in the Conduction and Dielectric Regimes, Physical Review E, Vol. 80, pp. 066304-1-9, 2009, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevE.80.066304
- ⑨ R. ANUGRAHA, Y. HIDAKA, T. UEKI, S. KAI, Symmetry-dependent Defect Structures in Soft-mode Turbulence, Physical Review E, Vol. 80, pp. 041701-1-4, 2009, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevE.80.041701
- ⑩ J. H. HUH, A. KURIBAYASHI, S. KAI, Difference in Noise-Induced Threshold shift between Planar and Homeotropic Electroconvections in Nematic Liquid Crystals, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 80, No. 8, pp. 083601-1-4, 2009 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.78.043601
- ⑪ J. H. HUH, S. KAI, Pure Noise-Induced Pattern Formations in a Nematic Liquid Crystal, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 78, No. 4, pp. 043601-1-4, 2009, 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.78.043601

その他 15 件

[学会発表] (計 57 件)

- ① T. NARUMI, F. NUGROHO, J. YOSHITANI, Y. HIDAKA, M. SUZUKI, S. KAI, Compressed Exponential Relaxation as Superposition of Dual Structure in Pattern Dynamics of Nematic Liquid Crystals, The 4th International Symposium on Slow Dynamics in Complex Systems, 2012/12/6, 東北大学片平キャンパス
- ② F. NUGROHO, Y. HIDAKA, T. UEKI, S. KAI, Transient Process in Soft-Mode Turbulence Controlling the Nambu-Goldstone Modes, 24th International Liquid Crystal Conference, 2012/8/21, Convention Center Rheingoldhalle, Mainz, Germany
- ③ T. NARUMI, J. YOSHITANI, M. SUZUKI, Y. HIDAKA, F. NUGROHO, S. KAI, Correlation Functions in Homeotropic Nematics: Non-Exponential Relaxation of Soft-Mode Turbulence, 24th International Liquid Crystal Conference, 2012/8/21, Convention Center Rheingoldhalle, Mainz, Germany
- ④ 甲斐昌一, 外部雑音の創発性と確率共鳴の研究動向, 豊田中央研究所特別講演会, 2012/8/10, 豊田中央研究所 (招待講演)
- ⑤ 甲斐昌一, 液晶電気対流のパターン形成と乱流, 国立天文台 ひので科学プロジェクト, 2012/2/24, 東京大学生産技術研究所 (招待講演)
- ⑥ S. KAI, Pattern Formation in Electro-convection in Liquid Crystals, International Symposium on Complex Systems 2011, 2011/12/1, Koshiba Hall The University of Tokyo, (招待講演)
- ⑦ F. NUGROHO, T. UEKI, Y. HIDAKA, S. KAI, Relaxation dynamics in of Spatiotemporal Chaos in the Nematic Liquid Crystal, 2011/11/20, 64th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Baltimore, Maryland, USA
- ⑧ 日高芳樹, 及川典子, 甲斐昌一, 液晶散逸構造の時空カオス制御, 2011/11/23, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 (SSI2011), 国立オリンピック記念青少年総合センター (招待講演)
- ⑨ 日高芳樹, 南部-ゴールドストーン・モードの関与した時空カオス-ソフトモード乱流, 九州大学応用力学研究所 平成 23 年度共同利用研究集会 「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2011/11/12, 九州大学応用力学研究所 (招待講演)
- ⑩ 日高芳樹, 時空カオスによる非熱的 Brown 運動, 2011/5/19, 福井大学工学部知能システム工学科第 33 回知能システム談話会, 福井大学 (招待講演)

- ⑪ 日高芳樹, 液晶における散逸構造と時空カオス, 2010/12/14, 信州大学理学部・数理科学談話会公開講演, 信州大学 (招待講演)
- ⑫ 甲斐昌一, 雑音の思いがけない役割, 日本物理学会 2010 年秋季大会市民科学講演会, 2010/9/26, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (招待講演)
- ⑬ 日高芳樹, F. NUGROHO, 植木達博, R. ANUGRAHA, 甲斐昌一, 液晶散逸構造のマクロ揺動と外場応答, 2010/9/17, 第 59 回高分子討論会, 北海道大学 高等教育機能開発総合センター
- ⑭ 甲斐昌一, 時間リズムと物理学, 日本時間学会 第 2 回大会, 2010/6/6, 山口大学, 招待講演
- ⑮ 日高芳樹, ソフトモード乱流における揺らぎ定理と時間相関関数, 2010/5/22, 非線形科学セミナー, 九州大学大橋キャンパス (招待講演)
- ⑯ R. ANUGRAHA, T. UEKI, Y. HIDAKA, M. I. TRIBELSKY, S. KAI, A Line Defect Structure in Soft-Mode Turbulence, 2010/3/16, American Physical Society March Meeting 2010, Portland, Oregon, USA
- ⑰ 甲斐昌一, 雑音が誘起する複雑現象と脳における確率共鳴, 平成 20 年度文部科学省「グローバル COE プログラム」『現象数理科学の形成と発展』キックオフフォーラム, 2009/3/7, 明治大学 紫紺館, (招待講演)
- ⑱ 日高芳樹, R. ANUGRAHA, 植木達博, 甲斐昌一, 液晶散逸構造における秩序-無秩序転移と線状欠陥, 2009/9/14, 2009 年日本液晶学会討論会, 東京農工大学小金井キャンパス
- ⑲ R. ANUGRAHA, T. UEKI, Y. HIDAKA, M. I. TRIBELSKY, S. KAI, A New Type of Defect in Soft-Mode Turbulence, 2009/11/12, 乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性, 九州大学筑紫キャンパス
その他 38 件

[図書] (計 4 件)

- ① 甲斐昌一, シーエムシー出版, 未来を動かすソフトアクチュエーター-高分子・生体材料を中心とした研究開発-, 2010, pp.135-145
- ② 日高芳樹, NTS, 自己組織化ハンドブック, 2009, pp.231-235
- ③ 甲斐昌一, NTS, 自己組織化ハンドブック, 2009, pp.8-10
- ④ 日高芳樹, 甲斐昌一, 培風館, 液晶のパターンダイナミクス/すべりと摩擦の科学 (非線形シリーズ), 2009, pp.3-92

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲斐 昌一 (KAI SHOICHI)
九州大学・大学院工学研究院・特命教授
研究者番号：20112295

(2) 研究分担者

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