

平成21年5月21日現在

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2005～2008
課題番号：17340119
研究課題名（和文）液晶におけるパターン形成の解明—ソフトモード乱流と一般化揺動定理
研究課題名（英文）Elucidation of Pattern Formation in Liquid Crystals --Soft-Mode Turbulence and Generalized Fluctuation Theorem--
研究代表者
甲斐 昌一（KAI SHOICHI）
研究者番号：20112295

研究成果の概要：散逸構造の代表例である液晶電気対流系における時空カオス「ソフトモード乱流」について、非平衡開放系のマクロ揺動とみなし、そのさまざまな性質を統計力学的な観点から明らかにした。その結果、時空カオスを生じる非線形相互作用における対称性の違いによって秩序-無秩序転移が起こること、時空カオスによる物質拡散において揺動定理が成立すること、その揺動を定量化するために温度が用いられることなどが明らかとなった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	6,600,000	0	6,600,000
2006年度	4,400,000	0	4,400,000
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	15,500,000	1,350,000	16,850,000

研究分野：非線形物理学

科研費の分科・細目：物理学 数理物理・物性基礎

キーワード：ソフトモード乱流，時空カオス，南部-ゴールドストーン・モード，散逸構造，非平衡統計物理学，揺動定理，ネマチック液晶，電気対流

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開放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、電気対流あるいは電気流体力学的不安定性と呼ばれている。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。

研究代表者は、液晶で起こる特異な物理現

象と見られていた電気対流を非線形非平衡物理学の研究対象として確立したパイオニアの一人であり、これまで数多くの成果をあげてきた。これまでの研究では、様々な新規パターンや非線形現象を発見し、詳細な観測からその性質を明らかにしてきた。最近では、液晶配向を制御することによって連続回転対称性をもつ系をつくり、新しい時空カオス「ソフトモード乱流(SMT, 図1)」を発見したことが成果として上げられる。これは、連続回転対称性の破れに伴う長波長揺らぎ(南部-ゴールドストーン・モード)と短波長対流モードの非線形結合によって発生し、これまでに見られない構造や分岐の特徴をもつ。

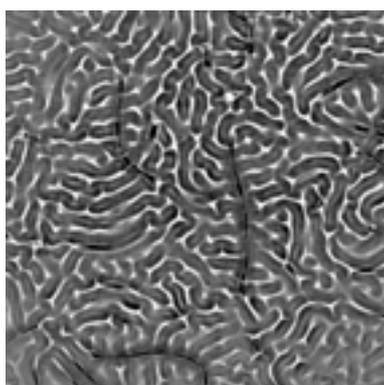


図1：ソフトモード乱流

これまでの散逸構造の研究は、まず場となる物質の物性定数を含む基礎方程式によって、ミクロな揺らぎからマクロ構造が現れる最初の分岐現象を明らかにし、さらに時空構造のマクロ秩序変数の非線形発展方程式を念頭に置いて、非線形力学の観点から時空パターンの分岐や安定性の解明を行うというプロセスで行われてきた。しかしさらに一步踏み込んで、散逸構造が生まれたことによって系の性質(物性)がどのように変わるかという視点が必要となる。しかしながら、そのような物性をどのように定義し測定するかという問題に関しては、いまだに十分な議論はなされていない。

2. 研究の目的

そこで本研究の目的は、そのようなこれまで考慮されてこなかった問題に目を向け、新しい物理学「散逸構造の統計物理」の構築に向けた実験的研究を行うことにある。平衡または線形非平衡系のミクロな線形揺らぎに対して確立された統計物理学とのアナロジーを考慮しながら、マクロな非線形揺らぎがその

主役となる散逸構造の輸送現象にアプローチする。

3. 研究の方法

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。そこで具体的には、SMTを主要な研究対象として、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必要がある。またこれまで、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“熱浴”となる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。

4. 研究成果

研究対象である液晶電気対流系では、液晶分子の配向制御によって場の対称性の異なる2種類の系をつくることができ、この対称性の違いによって現れる揺動にも違いがあることがわれわれの研究で明らかになってきている。

液晶ディレクタが電極に対して垂直に配列した「ホメオトロピック系」は、連続回転対称性をもつため、その自発的な破れによって南部-ゴールドストーン・モードが生じる。上述のように、南部-ゴールドストーン・モードである液晶ディレクタと対流モードの非線形結合によってSMTが生じる。SMTの特徴としては、

- ・対流発生と同時に超臨界分岐で生じるので、弱い揺らぎと弱い非線形結合を実現できる。
- ・対流波数ベクトルと液晶ディレクタの向きが連続回転できるので、2次元XY系としてふるまう。

以上の特徴から、SMTは線形系やスピンモデルとのアナロジーを考察し易い現象であると言える。

一方、ディレクタが電極に平行に配向した「プレーナー系」では、連続回転対称性が強

制的に破れているため、南部-ゴールドストーン・モードは存在しない。この系では、多様な非線形現象が生じることが以前から知られている。本研究では、SMTだけでなく、プレーナー系の非線形現象についても、統計物理学的な観点からの研究を行った。

(1) ホメオトロピック系

① ソフトモード乱流における秩序-無秩序転移

SMTには、対流モードとディレクタの相互作用の対称性の違いによって、Normal RollsとOblique Rollsの2種類がある。対流波数ベクトルをスピンと見なすことによって得られる「パターン秩序度」を導入し、両者の間の転移が秩序-無秩序転移であることを見出した(図2)。

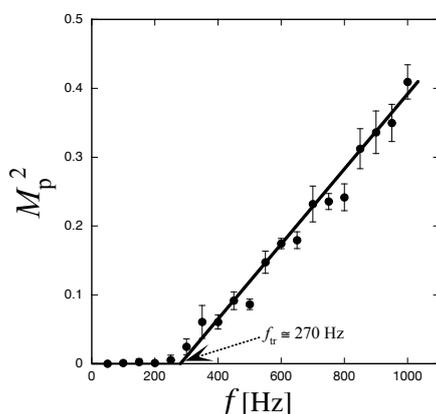


図2：SMTにおける秩序無秩序転移。

② 一定外力下の非平衡ブラウン運動

われわれは以前、SMTにおける非平衡ブラウン運動を観測し、拡散係数の粗視化時間依存性を求めることによって輸送現象の観点から統計力学的な性質を明らかにした。今回はさらに、サンプルを立てることにより、粒子にかかる重力が一定外力として作用する系でのブラウン運動を観測し、仕事に現れる揺動について調べた。その結果からソフトモード乱流の揺動力の大きさを拡張された温度によって定量化することに成功し、約100万Kという値を得た(図3)。また、これまで熱揺動で研究されてきた揺動定理(Gallavotti&Cohen)をこの揺動に適用することを試み、上記の温度との比較を行った。その結果、短い時間スケールでは揺動の時間相関のために両者の間にずれがあるが、時間スケールを長くすると一致していく傾向があることがわかった。

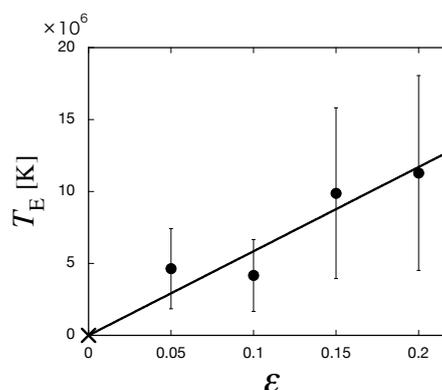


図3：SMTを特徴付ける温度の制御パラメータ依存性。

③ 連続回転対称性の破れと時空カオスへの転移

磁場印加によって連続回転対称性を破った系において、制御パラメータの増加による空間周期パターンから時空カオスへの転移を調べた。その結果、対流振幅が転移点で飛びを示すが、その転移はヒステリシスを伴わないことが明らかとなった。この結果は、同じ対称性をもつ理論モデルであるニコラエフスキー方程式から得られる結果と一致し、この特徴的な転移が異なる振幅スケリングが転移点で切り替わるために起こることがわかった。

④ ソフトモード乱流中のBlack Line

ソフトモード乱流中に見られる特徴的な線状パターン「Black Line」に注目し、偏光観察により、Black Lineがソフトモード乱流の揺動により自発的に形成された液晶配向場の線状構造であることがわかった(図4)。ソフトモード乱流中の液晶配向場は、南部-ゴールドストーン・モードの効果により、本来点欠陥しか存在できない2次元XY系として振る舞う。したがって線状のBlack Lineが存在することとの矛盾が生じたが、対流場と配向場の緩和時間の違いを利用した詳細な実験により、Black Lineがソフトモード乱流の非線形揺動の効果によって点欠陥が線状に引き伸ばされた擬似的線欠陥であることが明らかとなった。また、Black Lineの線密度の印加電圧の周波数依存性の測定により、Black Lineが対流場と配向場の相互作用における対称性の破れによって生じていることが明らかとなった。

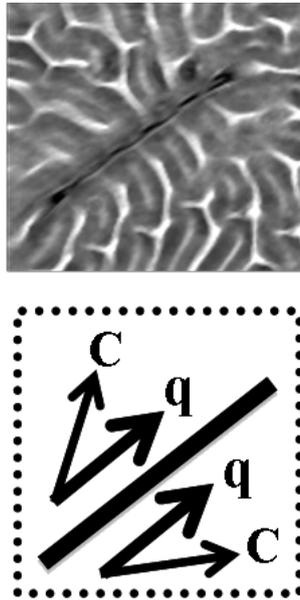


図4：SMTにおけるBlack Line. C は液晶配向ベクトル， q は対流波数ベクトルを表す。

⑤ パターン秩序度の磁場応答

液晶が磁化率異方性を有することから、磁場を印加することによって南部-ゴールドストーン・モードの寄与を制御することができる。これを利用して、ソフトモード乱流を外場応答の観点から調べた。オブジクロール領域において、(1)で述べたパターン秩序度の磁場強度依存性を定量的に求めた。その結果、パターン秩序度は磁場に対して非線形に増加しており、曲線の変化の仕方から典型的な秩序化過程を(i)線形秩序化領域、(ii)非線形秩序化領域、(iii)飽和秩序化領域の3つの領域に分類することができた。

(2) プレーナー系

① 時空間欠性への分岐

プレーナー系では、欠陥格子と呼ばれる高次秩序構造から乱流へ遷移する過程を調べ、以下のことを明らかにした。欠陥格子は、部分的に秩序(格子)構造が崩壊して無秩序(乱流)領域が現れる「時空間欠性」を示し(図5)、制御パラメータ上昇とともにその乱流領域が広がって乱流へ遷移することがわかった。

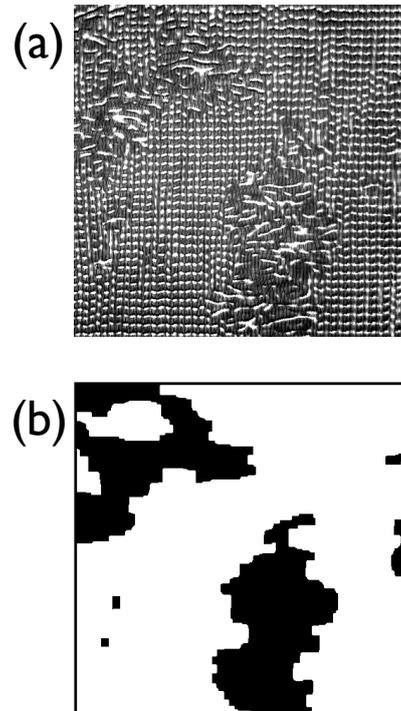


図5：時空間欠性。(b)は画像解析によって(a)を2値化したもの。

また、十分にゆっくりと制御パラメータを変化させた場合には、この遷移過程にはヒステリシスは現れず、連続転移であることがわかった。さらに、秩序状態と乱流状態を極小としてもつ現象論的ポテンシャルを考え、そこに揺動力を加えたLangevin型方程式によって、この乱流への遷移過程が説明できることを示した。



図6：Langevin型モデルから得られた時空間欠性。

② 時空間欠性における状態の持続時間分布

時空間欠性の、空間の1点における秩序(欠陥格子)または無秩序(乱流)状態の持続時間分布が、広いパラメータ領域においてべき分布を示すことを明らかにした。さらにこの実験

結果を説明するために、(1)で述べた Langevin型方程式に空間自由度をもたせた現象論的モデルを導入した(図6)。その結果、揺動力が空間的な相関をもつときに持続時間分布がべき的になることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者)

〔雑誌論文〕 (計10件)

1. “Soft-Mode Turbulence in Electroconvection of Nematics”

Yoshiki HIDAKA, Koyo TAMURA and Shoichi KAI: Progress of Theoretical Physics Supplement, No.161, pp.1-11, 2006 (査読あり)

2. “Transition to Turbulence via 2-dimensional Spatiotemporal Intermittency in an Electroconvective System of Nematics”

Noriko OIKAWA, Yoshiki HIDAKA and Shoichi KAI: Progress of Theoretical Physics Supplement, No.161, pp.320-323, 2006 (査読あり)

3. “Control Parameter Dependence of Spatial Domain Structures in Soft-Mode Turbulence”

Koyo TAMURA, Rinto ANUGRAHA, Ryohei MATSUO, Yoshiki HIDAKA and Shoichi KAI: Journal of the Physical Society of Japan, Vol.75, No.6, pp. 063801-1-4, June, 2006, 査読あり

4. “液晶散逸構造にみられる周期欠陥と時空カオス制御”

日高芳樹, 及川典子, 甲斐昌一: 日本液晶学会誌, Vol.10, No.1, pp.82-94, 2006 (解説)

5. “Statistical Properties of Spatiotemporal Intermittency in an Electroconvective System of Nematics”

Yoshiki HIDAKA: Proceedings of 2nd Jogja International Physics Conference, pp. KS012-KS015, 2007 (査読なし)

6. “Control of Spatiotemporal Intermittency by Parametric Resonance”

Noriko OIKAWA, Yoshiki HIDAKA and Shoichi KAI: 2007 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications Proceeding, pp. 47-50, September, 2007 (査読なし)

7. “Noise Effects on Threshold of Electrohydrodynamic Convection in

Nematic Liquid Crystals”

Jong-Hoon HUH and Shoichi KAI: Journal of the Physical Society of Japan, Vol.77, pp.083601-1-4, August, 2008 (査読あり)

8. “A Transition to Spatiotemporal Chaos under a Symmetry Breaking in a Homeotropic Nematic System”

Rinto ANUGRAHA, Yoshiki HIDAKA, Noriko OIKAWA and Shoichi KAI: Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 77, pp.073001-1-4, July, 2008 (査読あり)

9. “Order-Disorder Phase Transition in a Chaotic System”

Rinto ANUGRAHA, Koyo TAMURA, Yoshiki HIDAKA, Noriko OIKAWA and Shoichi KAI: Physical Review Letters, Vol. 100, pp.164503-1-4, April, 2008 (査読あり)

10. “Controlling Chaos for Spatiotemporal Intermittency”

Noriko OIKAWA, Yoshiki HIDAKA and Shoichi KAI: Physical Review E, Vol.77, pp.035205-1-4, March, 2008 (査読あり)

〔学会発表〕 (計16件)

1. “Pattern Formation in Precipitation Systems -Hierarchy and Nonlinear Dynamics-” (招待講演)

Shoichi KAI: Self-organization-Initiative Nano-Engineering (SINE), 2005年1月17日, 理化学研究所 (和光市)

2. “回転磁場下の液晶におけるパターン形成” (招待講演)

日高芳樹: 大阪市立大学応用物理学科理論ワークショップ, 2005年2月8日, 大阪市立大学工学部 (大阪市)

3. “2次元時空間欠性のカオス制御”

及川典子, 日高芳樹, 甲斐昌一: 2006年日本物理学会第61回年次大会, 2006年3月29日, 愛媛大学・松山大学 (松山市)

4. “Order-Disorder Phase Transition in Soft-Mode Turbulence”

Rinto ANUGRAHA, Koyo TAMURA, Yoshiki HIDAKA and Shoichi KAI: 日本物理学会2007年春季大会, 2007年3月18日, 鹿児島大学 (鹿児島市)

5. “Statistical Properties of Spatiotemporal Intermittency in an Electroconvective System of Nematics” (招待講演)

Yoshiki HIDAKA: The Second Jogja International Physics Conference, 2007年

9月7日, Physics Department, Gadjah Mada University (Jogjakarta, Indonesia)

6. “Control of Spatiotemporal Intermittency by Parametric Resonance”

Noriko OIKAWA, Yoshiki HIDAKA and Shoichi KAI: 2007 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2007年9月17日, Simon Fraser University (Vancouver, Canada)

7. “時空間欠性の持続時間における冪分布と相関をもつ揺動I”

及川典子, 日高芳樹, 三宮正裕, 甲斐昌一: 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 北海道大学 (札幌市)

8. “時空間欠性の持続時間における冪分布と相関をもつ揺動II”

日高芳樹, 及川典子, 甲斐昌一: 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 北海道大学 (札幌市)

9. “A New Type of Phase Transition from Ordered to Chaotic Patterns”

Rinto ANUGRAHA, Yoshiki HIDAKA, M. I. TRIBELSKY and Shoichi KAI: 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 北海道大学 (札幌市)

10. “ソフトモード乱流における一定外力下のBrown運動”

日高芳樹, 細川雄作, 及川典子, Rinto ANUGRAHA, 田村公洋, 甲斐昌一: 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月24日, 近畿大学 (東大阪市)

11. “液晶散逸構造における欠陥の自己組織化” (招待講演)

日高芳樹: 日本液晶学会ソフトマターフォーラム講演会「自己組織化とダイナミクス」, 2008年6月13日, 九州大学・西新プラザ (福岡市)

12. “ソフトモード乱流について” (招待講演)

日高芳樹: 第66回 形の科学シンポジウム「非平衡統計力学・非線形物理学と形の科学」, 2008年11月1日, 京都大学・芝蘭会館別館 (京都市)

13. “ソフトモード乱流におけるBrown運動と揺らぎ定理”

細川雄作, 日高芳樹, 甲斐昌一: 第66回 形の科学シンポジウム「非平衡統計力学・非線形物理学と形の科学」, 2008年11月2日, 京都大学・芝蘭会館別館 (京都市)

14. “Controlling Spatio-temporal Chaos in

Electroconvection of Nematics” (招待講演)

日高芳樹: 明治大学グローバルCOEプログラム「現象数理学の形成と発展」Nonlinear dynamics and pattern formation, 2008年11月27日, 明治大学・生田キャンパス (川崎市)

15. “液晶電気対流におけるソフトモード乱流” (招待講演)

日高芳樹: SOEセミナー, 2008年12月20日, 大橋サテライトLUNETTE (福岡市)

16. “Statistical Properties of Blackwall in Soft-Mode Turbulence”

Rinto ANUGRAHA, Tatsuhiko UEKI, Yoshiki HIDAKA and Shoichi KAI: 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月28日, 立教大学池袋キャンパス (東京都豊島区)

〔図書〕 (計1件)

『液晶のパターンダイナミクス』

日高芳樹, 甲斐昌一 (培風館, 2009年7月出版予定)

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・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