

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03464

研究課題名(和文) 1次元液晶対流系を用いた進行波及び孤立波のノイズ応答性の研究調査

研究課題名(英文) Noise effects on Traveling waves and solitons in one-dimensional liquid crystal cells

研究代表者

許 宗ふん (Huh, Jong-Hoon)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：50325578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では1次元液晶セルを用いた液晶電気対流における外部ノイズの影響を研究調査した。進行波及び孤立波の発生閾値電圧や速度及び進行方向に関するノイズの影響を体系的に調査し、これまでの2次元液晶セルでの調査結果と比較分析した。例えば、2次元系で見られる対流ロールの欠陥発生に代わって1次元系特有の対流ダイナミクスが現れた。また、次元系やノイズの種類(位相や振幅のゆらぎ)を超えて、対流ロールの波数とトータル印可電圧の普遍的な関係式を得た。これらの結果から、未知のノイズに対する液晶電気対流への影響に対して発生閾値電圧と波数の変化からそのノイズを特定する応用研究の可能性を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

古くから対流現象は物理基礎研究として、また産業応用研究として調査の対象であった。液晶電気対流現象は通常の熱対流現象と異なって、電気的手法で調査することで大きな実験的なメリットがある。本研究課題では電気対流現象を発生させる電界に意図的にノイズを加えた場合に、その対流発生条件の変化、つまり対流構造の安定性の問題を調査した。これは単なる対流現象の問題に留まらず、あらゆるノイズにさらされている多様な動的システムにおけるその安定性を究明する基礎研究としてその意義は重要である。さらに、これまでの定常波の調査を踏まえて、進行波及び孤立波の調査研究は基礎研究として非常に重要である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we address the effect of external noise on electroconvection (EC) of liquid crystals by employing a one-dimensional liquid crystal cell. We systematically examined the effects of noise on the threshold voltage, velocity, and traveling direction of traveling waves and solitary waves, and compared the results with previous ones found in two-dimensional cells. For example, peculiar dynamics appeared in the one-dimensional system, instead of the defect occurrence of the convection roll observed in the two-dimensional system. Moreover, a universal relationship between the wavenumber of the convection roll and the total applied voltage was obtained regardless of the one/two dimensional systems and the type of noise (i. e., fluctuations of phase and amplitude). From these results, we proposed the possibility of applied research to identify unknown noises by analyzing variation of the threshold voltage and wave number of EC under the noises.

研究分野：物性基礎

キーワード：液晶電気対流 液晶 進行波 孤立波 ノイズ 振幅ゆらぎ 位相ゆらぎ

1. 研究開始当初の背景

(1) 通常、ノイズは不要な信号として抑制・排除の対象と見なされる。しかしながら、ノイズが非平衡システムに関わった場合、確率共鳴をはじめとするノイズによる閾値下応答現象や秩序化現象のような直感に反する効果が様々な分野で報告されている。さらに、非平衡システムの本質は外部とのエネルギーや物質のやりとりから成り立っているため、ノイズに満ちている外部環境の影響は避けられない。

(2) 報告者はこれまで液晶対流系を用いて、印加電界にノイズを定量的に追加する手法を開発し、非平衡散逸系のパターン形成とそのダイナミクスにおけるノイズの影響を研究してきた。液晶対流は、ディレクター(棒状液晶分子の平均的な方向を表す単位ベクトル)と空間電荷が交流電界によって駆動され発生する。報告者はカラーノイズ(cutoff周波数 $f_c$ で決まる)を用いることによって、対流発生閾値( $V_c$ )のノイズ強度( $V_N$ )との関係式(1)を得た。

$$V_c^2 = V_{c0}^2 + bV_N^2 \quad (1)$$

ここで、 $V_{c0}$ は $V_N=0$ のときの対流発生閾値を示し、対流のノイズ応答感度 $b$ は $f_c$ によって決まる。これまでの調査で、カラーノイズによる対流発生の助長効果( $b < 0$ )とホワイトノイズの抑制効果( $b > 0$ )が明らかになった。

(3) 報告者は液晶対流系における様々な散逸構造のメカニズム解明とともに、それらが外部ノイズ環境にどのような影響を受けるかという問題に強い関心を持っている。本課題ではパターンとリズム両方を併せ持っている興味深い進行波(Traveling Waves: TW)を取り上げた。通常の2次元セルを用いてノイズの影響を調べると、ノイズによるTWの速さ(又はHopf周波数)の変化とロール欠陥の運動が混じり合い、真のノイズ効果が解明できないことが分かった。例えば、図1に示す時空間図では、欠陥の不規則運動により、ノイズの印加によるTWの特性調査が困難になる。そこで液晶デバイスに広く応用されているIn-plane switching (IPS)モード・セルを初めて導入し、1次元対流系(図2)の試作に成功した。1次元セルで実現される「欠陥のない対流」を用いて体系的にTWを調査するという本研究の着想に至った。

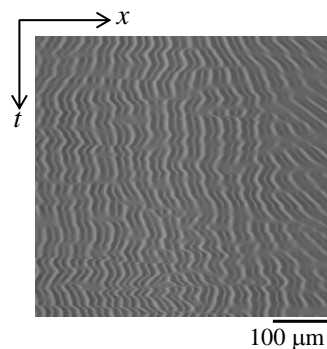


図1: 2次元セルにおいてノイズ印加時のTWの時空間図。図4(a)の1次元セルでの時空間図と異なり、欠陥の生成・消滅・運動が著しい。

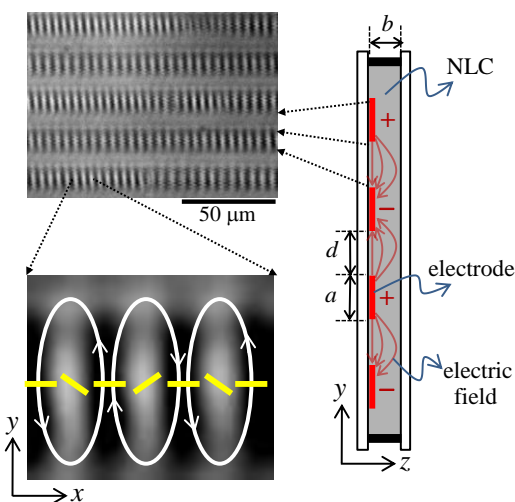


図2: 電極幅 $a=10\ \mu\text{m}$ 、電極間 $d=10\ \mu\text{m}$ 、液晶層 $b=50\ \mu\text{m}$ で試作した1次元セルと対流パターン。NLCはネマティック液晶を表す。通常の2次元セルと違って、欠陥の生じない対流(Defect-free electroconvection)が実現できる。

## 2. 研究の目的

本研究では進行波及び孤立波に対するノイズの影響及びその制御可能性を、1次元液晶系(図2)を用いて解明する。進行波が空間的に局在化した場合、孤立波(ソリトン)が現れる。これまでの研究は、静止ロール状パターン(Williams domain: WD)に関するもの[式(1)]であり、TWは、すでにWeak-electrolyte model (WEM)によって説明されていたが、最近、報告者はより一般的なActivator-Inhibitorモデルとして再検証した。「オーム電導度からのずれ」と「液晶ディレクターの初期配向値からの変調(電気対流)」はそれぞれActivatorとInhibitorとして働く。従って、TWを用いて「Activator-Inhibitorモデルは外部ノイズにどのように応答するか」を調査することを目的とする。

## 3. 研究の方法

これまで報告者が確立してきた液晶対流実験システム(図3)、ノイズ制御手法、動的画像解析手法を用いて、以下のような具体的な調査を行った。

- (1) 1次元セルにおける電気対流の相図を作成するとともにTWの特性を測定する。図4(a)のような時空間図を作成しフーリエ変換からHopf周波数( $f_H$ )を測定する。2次元セルの結果と比較分析する。
- (2) WD-TW転移現象におけるノイズ影響を調査する。具体的には、静止波(WD;  $f_H = 0$ )から進行波(TW;  $f_H \neq 0$ )への転移[正弦波電界の特性周波数( $f_{TW}$ )]におけるノイズ依存性を測定する。
- (3) TWの発生閾値(Inhibitor)のノイズ依存性を検証する。静止波(WD)と進行波(TW)の結果を比較分析する。
- (4) TWの電気伝導度依存性(Activator)を検証する。温度制御方法を用いて電気伝導度を制御する。
- (5) 図4(b)のような孤立波(非線形Schrödinger型の包絡ソリトン)の発生条件とノイズ依存性を調査する。
- (6) ソリトンの一般特性、例えば、孤立波としての安定性やソリトン同士の衝突問題を調査する。
- (7) 上記の1次元セルでの調査結果を2次元セルの結果と比較分析する。

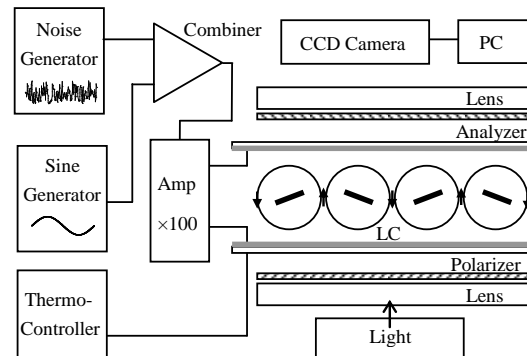


図3: 実験系。ジェネレーターにより正弦波とノイズを印加し、偏光顕微鏡及びCCDカメラから対流発生を観測する。PCで画像解析を行う。

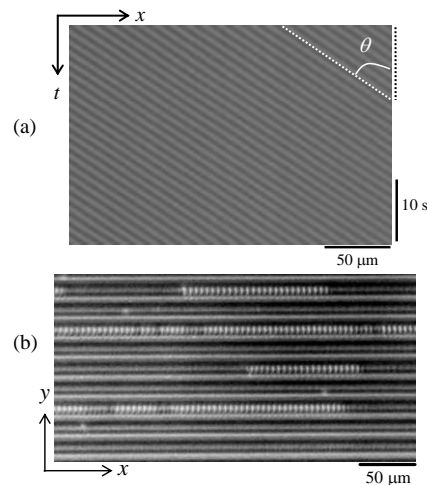


図4: (a) 1次元系のTWパターンからの任意の1次元ライン(X)を時間で並べた時空間図。(b) 1次元セルで現れたソリトンの一例。正弦波電圧やノイズ印加によってソリトンの速度が変わる。さらに、ソリトン同士の追突や衝突が起きる。

#### 4. 研究成果

本課題で得られた、進行波 (Traveling waves: TW) 及び孤立波 (Localized waves: LW) の発生閾値 ( $V_c$ ) や動的特性 ( $f_H$ ) 等に関する主な結果は以下である。

- (1) 図 5 に示すように、ノイズ強度( $V_N$ )によって、TW の Hopf 周波数( $f_H$ )が変化する。  $V_N$  によって  $f_H$  は単調に増加することが分かる[引用文献①]。これは 2 次元セルでの結果と定性的な一致を示した。しかし、1 次元セルでは、新たな Non-travelling waves が現れ、パターンダイナミクスを複雑にさせる場合がある。これは、2 次元セルでの欠陥の運動に相当する対流渦の空間限定的な振動モードとして、余剰エネルギー解消の一種と考えられる[引用文献①]。
- (2) ある強度以上のノイズ電圧( $V_N$ )を印加すると、セル内に液晶特有のディスクリネーションが発生し、Right-propagating TW(RTW)と Left-propagating TW(LTW)が現れた。しかしながら、その進行方向は完全にランダムで制御できない。これは図 6 で示すように、進行波のソース (source) 及びシンク (sink) となるディスクリネーションをノイズでは制御できないからである[引用文献②]。
- (3) 液晶電気対流渦の形の異方性から、磁界による進行方向の調査を試みた結果、RTW と LTW の制御に成功した (図 7)。この磁界による制御の場合には、上記(2)で述べたディスクリネーションが発生しないまま、その進行方向の制御が可能となる[引用文献③]。
- (4) 正弦波電圧 ( $V$ ) による LW の動的特性を調べた結果、図 8 に示すように LW の長さや速さの依存性が確認できた[引用文献②]。また、LW の発生条件におけるノイズの影響を明らかにした。
- (5) 1 次元セルの TW の構造 (波数  $k_c$ ) と比較するため、2 次元セルの定常波(WD)の波数を調査した結果、外部ノイズ (振幅ノイズや位相ノイズ) を含むトータル電圧  $V_T$  と

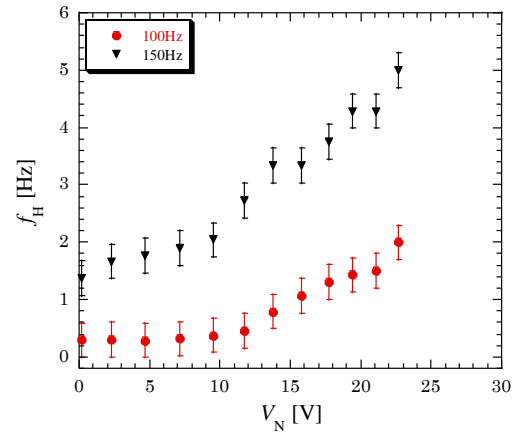


図 5: TW の Hopf 周波数( $f_H$ )のノイズ強度 ( $V_N$ )依存性.

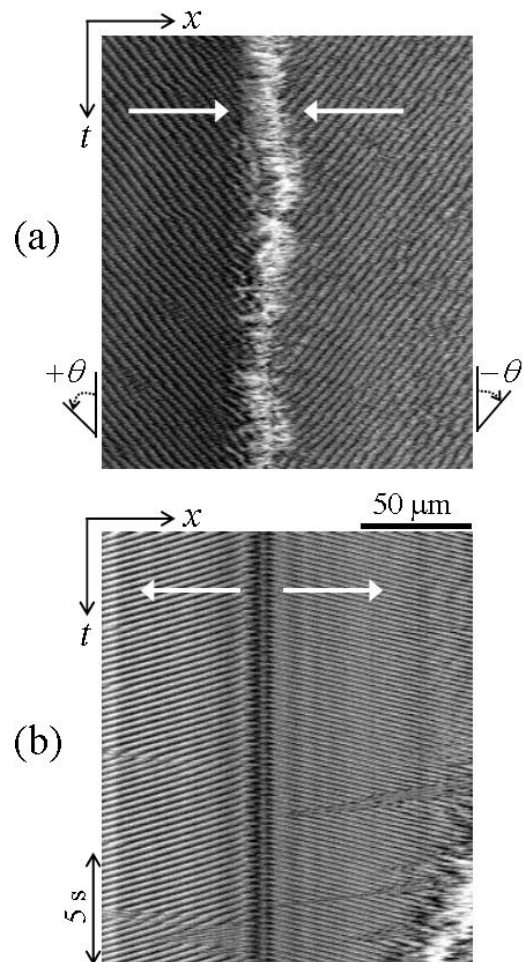


図 6: TW の進行方向を決めるディスクリネーションによる(b)ソース (source) 及び(a)シンク (sink). 例えば、シンク(a)では RTW と LTW が衝突して吸い込まれる。



波数  $k_c$  において普遍的な関係式 ( $V_T/k_c^2 = \text{const.}$ ) が得られた。これはノイズの有無やノイズの種類に依存しない、さらに、1次元系でも2次元系でも成り立つことが確認できた[引用文献④].

- (6) 上記(5)の結果は、これまでの発生閾値電圧  $V_c$  は、ノイズの種類 (振幅ノイズや位相ノイズ) やノイズの cutoff 周波数 ( $f_c$ ) に強く依存した結果から、発生閾値電圧は印加電界の波形効果 (Field effect) であり、電気対流の構造 (波数) はトータル電圧 (波形を時間平均した有効電圧  $V_T$ ) の効果 (Power effect) であることが分かった[引用文献④].
- (7) 上記(5)及び(6)の結果から、未知のノイズに対する電気対流への影響に対して発生閾値電圧と波数の変化からそのノイズを特定する応用研究の可能性を提案した。これからその具体的な応用例を示す調査が必要となる。

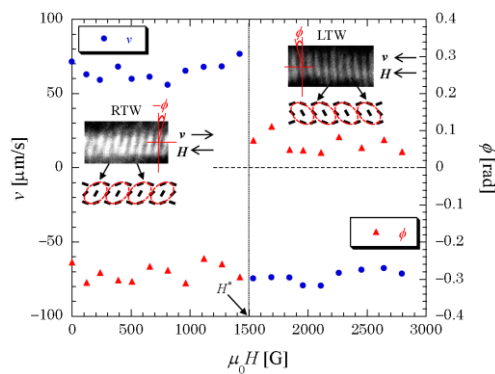


図 7: 印加磁界による TW の進行方向の制御.

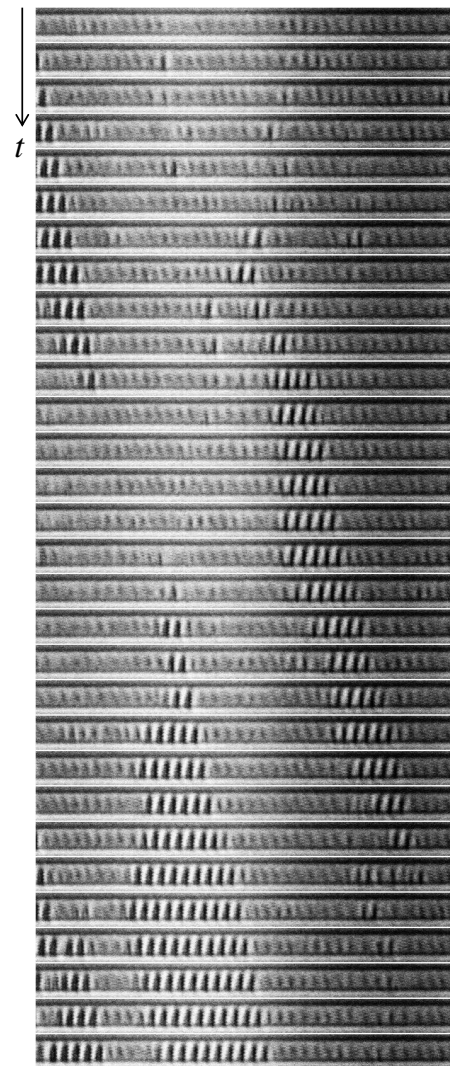


図 8: LW の時間変化 ( $V = 48 \text{ V}$ ,  $f = 600 \text{ Hz}$ ). LW の生成・消滅・進行の様子が分かる。時間間隔は  $\Delta t = 0.1 \text{ s}$  である。

<引用文献>

- ① *Electroconvection in one-dimensional liquid crystal cells*, Jong-Hoon Huh, Phys. Rev. E **97**, 042707 (2018).
- ② *Traveling waves in one-dimensional electroconvection of nematic liquid crystals*, Akira Horikawa and Jong-Hoon Huh, Journal of the Physical Society of Japan **88**, 034602 (2019).
- ③ *Control of the Orientation of Traveling Waves in AC-Driven Electroconvection by Additional Fields*, Horikawa Akira and Huh Jong-Hoon, Journal of the Physical Society of Japan **89**, 034602(2020).
- ④ *Additional Deterministic and Stochastic Field-Induced Shifts of the Threshold and Wavenumber of AC-Driven Electroconvection in Nematic Liquid Crystals*, Naoto Miyagawa, Yoshimitsu Yano, and Jong-Hoon Huh, Journal of the Physical Society of Japan **89**, 095003(2020).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Huh Jong-Hoon	4. 巻 97
2. 論文標題 Electroconvection in one-dimensional liquid crystal cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 042707 ~ 042707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.97.042707	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 Jhun Chul Gyu, Choi Gyu Jin, Ryu Dae Geon, Huh Jong-Hoon, Gwag Jin Seog	4. 巻 98
2. 論文標題 State transition at electrohydrodynamic convection of twisted nematic liquid crystals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 052704 ~ 052704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.98.052704	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
1. 著者名 Horikawa Akira, Huh Jong-Hoon	4. 巻 88
2. 論文標題 Traveling Waves in One-Dimensional Electroconvection of Nematic Liquid Crystals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034602 ~ 034602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.034602	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 Huh Jong-Hoon, Yano Yoshimitsu, Miyagawa Naoto	4. 巻 88
2. 論文標題 Phase Noise Can Induce Stochastic Resonance?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 063001 ~ 063001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.063001	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 Horikawa Akira, Huh Jong-Hoon	4. 巻 89
2. 論文標題 Control of the Orientation of Traveling Waves in AC-Driven Electroconvection by Additional Fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034602 ~ 034602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.034602	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 Miyagawa Naoto, Yano Yoshimitsu, Huh Jong-Hoon	4. 巻 89
2. 論文標題 Additional Deterministic and Stochastic Field-Induced Shifts of the Threshold and Wavenumber of AC-Driven Electroconvection in Nematic Liquid Crystals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 095003 ~ 095003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.095003	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 Huh Jong-Hoon, Osoguchi Haruki	4. 巻 101
2. 論文標題 Formation of grid patterns in an ac-driven electroconvection system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 062701 ~ 062701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.062701	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 Ryu Dae Geon, Huh Jong-Hoon, Kim Young-Ki, Gwag Jin Seog	4. 巻 101
2. 論文標題 Characterization of surface anchoring energy of nematic liquid crystals via electrohydrodynamic instability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 062703 ~ 062703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.062703	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

1. 著者名 Shiomi Masato, Choi E-Joon, Huh Jong-Hoon	4. 巻 102
2. 論文標題 Prewavy instability-originated dielectric chevrons of electroconvection in nematic liquid crystals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 042704 ~ 042704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.102.042704	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9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 矢野 芳光, 堀川 晃, 瀬口 治生, 宮川 直人, 許 宗焄
2. 発表標題 カラーノイズによる液晶対流系の制御
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 堀川 晃, 矢野 芳光, 瀬口 治生, 許 宗焄
2. 発表標題 1次元液晶電気対流系におけるTraveling Wavesの調査
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 Yoshimitsu Yano, Naoto Miyagawa, and Jong-Hoon Huh
2. 発表標題 Phase Noise-Induced Pattern Evolution in Electroconvection of Nematic Liquid Crystals
3. 学会等名 APICENS Asia-Pacific Conference on Engineering & Natural Sciences (APICENS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Akira Horikawa and Jong-Hoon Huh
2. 発表標題 Direction change of Traveling waves in one-dimensional Electroconvection
3. 学会等名 APICENS Asia-Pacific Conference on Engineering & Natural Sciences (APICENS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮川 直人, 堀川 晃, 獺口 治生, 塩見 雅人, 許 宗焄
2. 発表標題 液晶電気対流系におけるノイズ影響
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 塩見 雅人, 宮川 直人, 許 宗焄
2. 発表標題 誘電領域における電気流体的不安定性の調査
3. 学会等名 西日本非線形科学研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮川 直人, 矢野 芳光, 許 宗焄
2. 発表標題 液晶電気対流系における外乱の効果
3. 学会等名 西日本非線形科学研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩見 雅人, 宮川 直人, 許 宗焄
2. 発表標題 誘電領域における電気流体的不安定性の調査
3. 学会等名 2020年日本液晶学会オンライン研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮川 直人, 矢野 芳光, 許 宗焄
2. 発表標題 液晶電気対流系における外乱の効果
3. 学会等名 2020年日本液晶学会オンライン研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関