

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006-2008

課題番号：18540375

研究課題名（和文） 液晶光バルブにおける非線形パターンダイナミクスと
カオス同期の研究研究課題名（英文） Nonlinear pattern dynamics and chaos synchronization in a
liquid crystal light valve

研究代表者

長屋 智之 (NAGAYA TOMOYUKI)

大分大学・工学部・教授

研究者番号 00228058

研究成果の概要：

液晶光バルブは、液晶、鏡、光導電物質を2枚の透明電極付ガラス板で挟んだものである。ガラス間に電圧を掛け、液晶側に光を入れた光を鏡で反射させ、その光を光導電物質に入れると、ある条件で液晶の向く方向にある構造（自己組織化構造）が現れる。この構造は、初めは静止しているが、電圧を増やすとある電圧から構造が揺らぎ始め、次第に揺らぎが強くなってカオス状態になる。本研究では、静止した自己組織化構造がどのようなメカニズムでカオス状態に移り変わるかを実験とシミュレーションによって明らかにした。また、カオス状態での構造の乱れの程度を定量的に分析した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2006年度 | 2,400,000 | 0 | 2,400,000 |
| 2007年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2008年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 330,000 | 3,830,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：自己組織化、パターン形成、液晶、画像解析、不安定性、カオス

1. 研究開始当初の背景

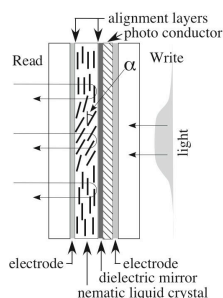


図1 液晶光バルブの構造

液晶光バルブ(Liquid Crystal Light Valve:LCLV)は、図1に示すように、ネマチック液晶、誘電多層膜ミラー、光導電体を2枚の透明電極付ガラス板で挟んだ構造をしている。光導電体(Write)側に光 $I_w(\mathbf{r}, t)$ を照射すると、光導電体内にフォトキャリアが発生するため、電極間に電圧 V が印加されていると、液晶の傾き角 α が V と $I_w(\mathbf{r}, t)$ に応じて変化する。直線偏光を液晶(Read)側に入射すると、液晶層で常光と異常光が分かれて伝播し、それらが誘電ミラーで反射され、液晶層から楕円偏光した光が出てくる。この楕円偏光の

位相 $\phi(\mathbf{r}, t)$ は、 V と $I_w(\mathbf{r}, t)$ に依存して変化する。Read 側の出射光を Write 側にフィードバックすると、ある条件で液晶の傾き角 α が二つの異なる角度で安定になる (双安定性)。フィードバック方法、印加電圧、光強度、光学配置を変化させることによって、非常に多彩な自己組織化パターンが出現するため、非線形動力学の興味深い実験系として研究されている。

光導体内に生じるフォトキャリアは光の強度に応じて生成されるため、フィードバックの際に位相 $\phi(\mathbf{r}, t)$ の情報を強度に変換する必要がある。この変換方法には (i) 干渉型と (ii) 回折型の 2 種類がある。干渉型では、偏光板を用いて位相-強度変換を行い、回折型ではフィードバックに用いるレンズの結像位置を Write 側からずらし、そのずらした空間で回折を起こさせることによって位相-強度変換を行う。多彩なパターンが出現するのは、フィードバックの方法と光学配置に多様性があるためである。干渉型のフィードバックに回転を導入すると、回転角 Δ が 2π と整合する場合は、傾き角 α が双安定性を示す電圧領域で π/Δ 本の静的な花卉状パターンが出現する。静的な状態から電圧を増加させていくと、ある電圧でパターンが揺らぎ始め、電圧の増加と共に揺らぎが増大していく。さらに電圧を増大させ、傾き角の双安定領域を超えると、花卉状パターンが無くなる。 $\Delta=30^\circ$ の場合のパターンの電圧変化を図 2 に示す。

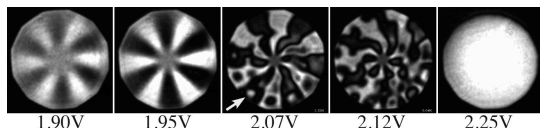


図 2 $\Delta=30^\circ$ での花卉状パターンの電圧変化

2. 研究の目的

花卉状パターンは Akhmanov らが初めて観測した。Adachihara らは、静的な花卉状パターンの生成メカニズムを理論とシミュレーションによって解明した。その後、Ramazza らは、花卉状パターンの揺らぎの特徴を、空間と時間の相関関数を用いて解析した。しかし、時空揺らぎの特徴は十分解析されておらず、また、静的なパターンがどの様に不安定化するかはわかっていない。そこで、本研究では、この不安定化のシナリオと時空カオスの発展の様子を調べる実験とシミュレーションを行った。また、時空カオス領域での揺らぎの程度を定量的に解析した。

3. 研究の方法

(1) 実験で用いた光学系を図 3 に示す。LCLV は浜松ホトニクス製液晶空間光変調器 PAL-SLM を使用した。He-Ne レーザーの光を対物レンズとピンホールでコリメートし

て直径 10mm の平行光を LCLV の Read 側に液晶の配向に対して 45° で入射した。そして、反射光をミラーと光ファイバー束で Write 側にフィードバックした。信号発生器を用いて 1.9V から 2.3V までの交流電圧 (α の双安定領域) を印加した。周波数は 1kHz に固定した。レンズ L_2 の焦点面をファイバー束の入り口の面から距離 L (自由伝搬長) だけずらすとこの間で回折が起きるが、花卉状パターンは純粋な干渉型のフィードバックで観測できるため、 $L=0$ とした。つまり、回折効果は生じない。フィードバック光の 10% を BS_2 でサンプリングして CCD カメラで観測した。揺らぎの平均的な特徴を捉えるために、同じ条件で 10 回測定した。図 2 はこの実験系でのパターンの電圧変化である。

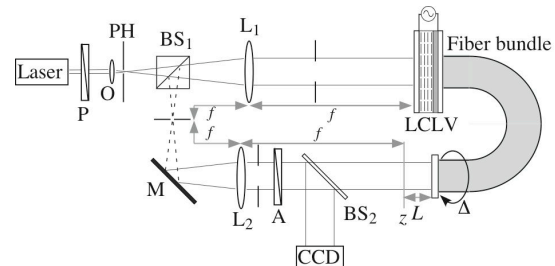


図 3 光学実験系

花卉状パターンは放射状であるので、カメラの光の強度 $I(x, y, t)$ を極座標での強度 $I(r, \theta, t)$ に変換し、方位角 θ に関するフーリエ係数 $I(r, k_\theta, t)$ を計算して、 $r=1.5\text{mm}$ から 4.5mm まで 0.5mm 毎に以下の物理量を求めた。

- 時間平均方位角パワースペクトル $P(r, k_\theta)$
- 方位角方向平均時間相関関数 $C(r, t)$
- $I(r, k_\theta, t)$ の時間相関関数 $C_{k_\theta}(r, t)$

(2) 静的な花卉状パターンの不安定点近傍では、光学部品のわずかなミスアライメントによって発生する揺らぎが影響を受ける。そこで、現象論モデルに基づいた数値シミュレーションを行った。これまでに LCLV の自己組織化パターンを記述するモデルがいくつか提案されており、それらのモデルでは、Read 光の常光と異常光の位相差 $\phi(\mathbf{r}, t)$ が拡散とフィードバック光に依存して時間変化すると考えられている。このフィードバック効果を見積もる際には、LCLV の特性を評価する必要がある。過去の花卉状パターンに対するモデルでは、LCLV の電圧応答特性を三角関数で近似しているが、これは広い電圧範囲では良い近似にはならない。LCLV の応答特性を示す理論式は導かれていないが、広い電圧範囲で良い近似を行う手法が Iino らによって提案されている。そこで、本研究では、Iino らのモデルを改良し、位相差 $\phi(\mathbf{r}, t)$ の時間発展を次式で記述してシミュレーションを行った。

$$\tau \frac{\partial \phi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -\phi(\mathbf{r}, t) + p + l_d \nabla^2 \phi(\mathbf{r}, t) - pR[F(I_w(\mathbf{r}, t))]$$

ここで、 τ は位相差の緩和時間、 l_d は位相差の拡散長、 p は無電圧時の位相差、 R は空間回転演算子、 F はLCLVの特性関数、 I_w はWrite光強度である。位相差の初期値として、 $\phi(\mathbf{r}, 0) = 30.67 + \delta\phi(\mathbf{r})$ とした。第1項は、LCLVの無電圧時の位相差、第2項は初期の位相の空間揺らぎである。

(3)カオス領域における揺らぎの程度を定量的に解析するために、Karhunen-Loeve展開を用いた解析を行った。KL展開では、観測した動画像を互いに相関の無い動画像群に分離する。観測した画像の時間変化を $I(r, t)$ 、その時間平均を $\langle I(r, t) \rangle_t$ とし、この差を $U(r, t)$ と定義すると、

$$U(r, t) = \sum_n \mu_n \psi_n(r) \varphi_n(t)$$

と展開できる。ここで、 μ_n は振幅であり、その2乗 $\lambda_n = \mu_n^2$ が n 番目のKLモードのエネルギーに対応する。 $\psi_n(r)$ は空間固有関数、 $\varphi_n(t)$ は時間固有関数である。 $U(r, t)$ を行列で表し、共分散行列 $K = U^T U$ を対角化したときの固有値が λ_n に対応する。固有値列 $\{\lambda_n\}$ から揺らぎの複雑性を評価できる。全てのモードのエネルギー和 $\sum_n \lambda_n$ で固有値を規格化した相対固有値 $E_n = \lambda_n / \sum_i \lambda_i$ を用いると、 n 番目までのモードを使って再構成した動画像 $U_n(r, t)$ と、元々の動画像との相関 $C(n)$ と、揺らぎの複雑性を定量化する大域エントロピー S が E_n を用いて次式で表せる。

$$C(n) = \frac{\langle U(r, t) U_n(r, t) \rangle}{\sqrt{\langle U(r, t) \rangle \langle U_n(r, t) \rangle}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_i}$$

$$S = -\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\log N} \sum_{i=1}^N E_i \log E_i$$

4. 研究成果

(1) パワースペクトル、相関関数の結果

回転角 $\Delta = 30^\circ$ の場合、花卉数6のパターンが現れる。この構造に対応する基本波数 $k_0 = 6$ とその半分の波数のパワースペクトル値の電圧変化を図4に示す。静的花卉状パターンは約1.90Vで現れ始め、電圧の増加と共にコントラストが明瞭になってくる。2.00V程度まではパターンは静止しているが、さらに電圧を増加すると花卉が揺らぎ始める。 $k_0 = 6$ の基本モードは、1.95Vで急激に大きくなり、1.975V以上で減衰し始める。 $P(r, 6)$ は、半径による違いは比較的に小さい。一方、基本周期の倍に対応する $k_0 = 3$ のモードは、基本モードが減少している2.000Vから2.025Vにおいて2.5mm $<r<3.5$ mmの範囲で増加している

ことがわかる。これは、この電圧領域で隣り合う花卉の濃淡に差が出ていることを示す。この花卉の濃淡に差が出ている花卉パターンを2色性花卉パターン(bicolored petal)と名付けた。

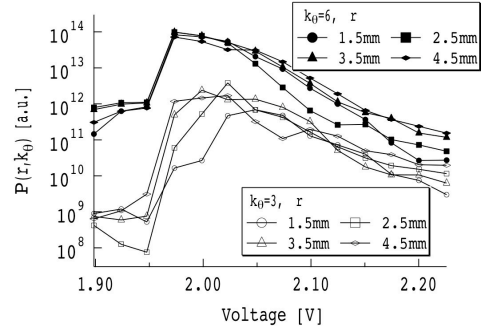


図4 パワースペクトル値の電圧変化

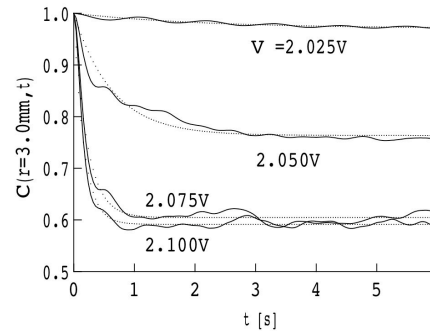


図5 $r=3$ mmでの時間相関関数

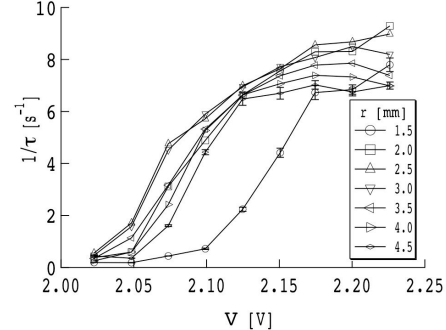


図6 緩和周波数の電圧依存性

次に、時間相関関数 $C(r, t)$ の測定結果を $r=3$ mmを例にして図5に示す。各電圧の時間相関関数を、指数関数型の減衰式でfittingした場合の緩和時間を τ 、その逆数 $1/\tau$ を緩和周波数と定義し、その電圧 V 依存性を図6とに示した。パターンの揺らぎは半径が2.5mmから3.0mmの領域で生じ始める。半径が小さい領域では、 $\Delta = 30^\circ$ 回転の境界条件を短い円周で課すために、液晶が受ける拘束力が強くなり、その結果揺らぎが発生しにくいと考えられる。また、半径が大きい領域では、 $r > 5$ mmの静止している液晶から拘束力を受けるために揺らぎが発生しにくいと考えられる。揺らぎが発生しやすい $r=3$ mmにおける $k_0 = 6$ と3のモードの時間相関関数 $C_{k_0}(r, t)$

の結果を図7と図8に示す。 $V=2.025V$ では、 $C_6(r,t)$ はほとんど一定で変化が無いが、 $C_3(r,t)$ は振動しながら減衰していることがわかる。これは、後に示すように、花卉内に配向が異なるドメインが発生し、方位角方向に伝播するためである。

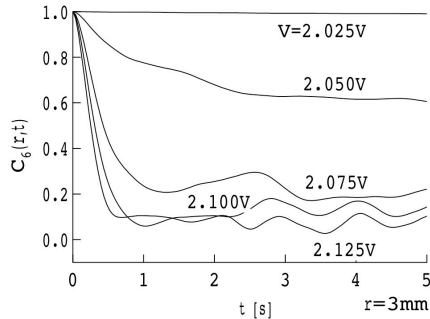


図7 $k_0=6$ のモードの時間相関関数

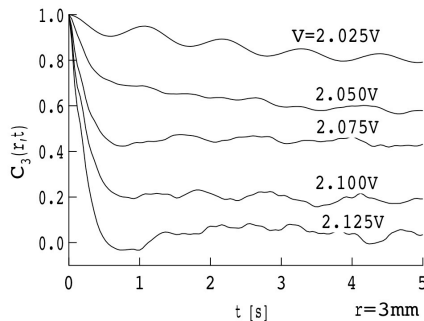


図8 $k_0=3$ のモードの時間相関関数

(2) 数値シミュレーション結果

上記のモデルに基づいて、回転角 $\Delta=30^\circ$ として、静的な花卉状パターンが不安定化する電圧領域でパターンの生成過程を調べるシミュレーションを行った。 $r=3mm$ における方位角 θ 方向の時間変化と、ある時刻でのパターンを図9に示す。

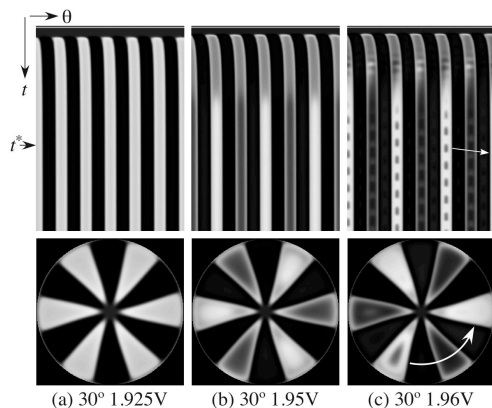


図9 $\Delta=30^\circ$ 回転の数値シミュレーション

$V=1.925V$ では、 $k_0=6$ の構造ができた後はパターンに時間変化は起きていない。1.950Vでは、 $k_0=6$ の基本構造ができた後、 $k_0=3$ のモードが生じて隣り合う花卉の濃淡が異なる

る静的な高次構造ができた。そして、1.96Vでは、 $k_0=3$ のモードが生じた後、花卉の中に配向の異なるドメインが発生し、それが方位角方向に一つ飛びに伝播する動的なパターンとなった。ただし、パターン全体は回転していない。

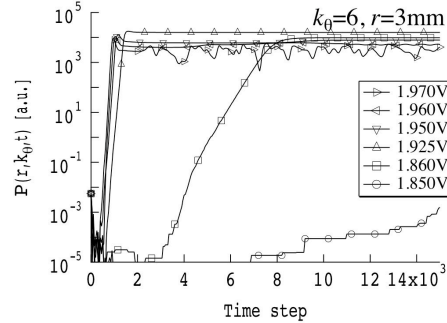


図10 $k_0=6$ パワースペクトル時間変化

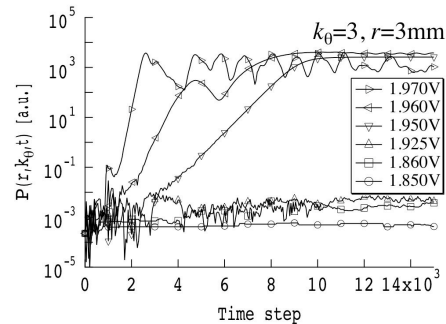


図11 $k_0=3$ パワースペクトル時間変化

図10と図11に $k_0=6$ と3のパワースペクトル値の時間変化を示す。1.95Vまでは $k_0=3$ のモードが生じないことがわかる。一方、1.95V以上では、 $k_0=3$ のモードが生じることにより、 $k_0=6$ のモードが減少することがわかる。図11で、1.97Vの $k_0=3$ のモードが振動しているのは、方位角方向に伝播するドメインの存在に起因すると考えられる。

上記のように、 $\Delta=30^\circ$ の場合は、伝播するドメインが発生する前に、 $k_0=3$ のモードが生じて静的な高次構造が出現した。もし、花卉の数が奇数ならこの様な構造はできるのだろうか。それを確かめるために、 $\Delta=36^\circ$ の場合で同様なシミュレーションを行った。その結果を図12に示す。 $\Delta=36^\circ$ の場合は、1.95Vまでは静的な $k_0=5$ の基本モードが生成する。1.95Vでは、一つの花弁の中央が明るくなり、それが方位角方向に伝播する動的パターンとなった。 $k_0=5$ の半分は整数ではないため高次構造は静的には存在できないと考えられる。1.96Vでは花卉の一部にドメインが現れ、それが方位角方向に伝播する。これらの偶奇性の特徴は、 $\Delta=45^\circ, 60^\circ$ の場合においても存在することがわかった。シミュレーションに対応する実験結果を図13に示す。シミュレーションほど顕著でないが方位角方向に伝播するドメインを確認できた。

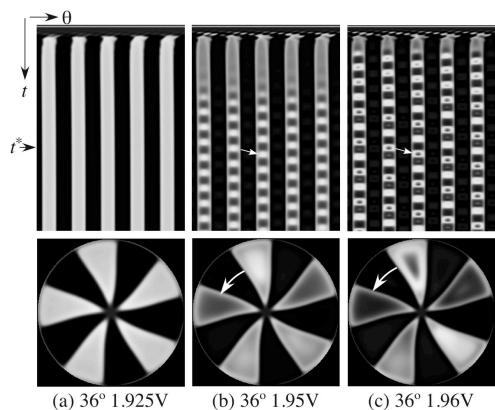


図 12 $\Delta=36^\circ$ 回転の数値シミュレーション

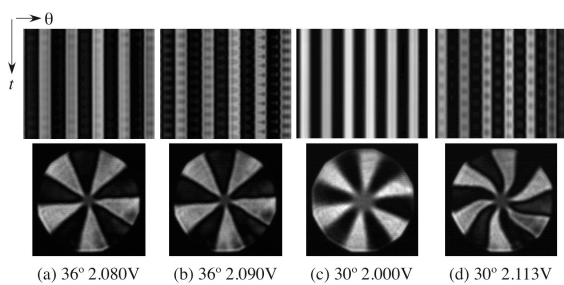


図 13 実験による伝播ドメインの観測(b),(d)

(3) Karhunen-Loeve 展開の解析結果

図 14 に固有値分布の電圧変化を示す。静的花卉状パターン領域では、殆ど $n=1$ のモードにエネルギーが集中しているが、電圧が増加して不安定領域になると、上位のモードのエネルギーが徐々に増えてくるのがわかる。

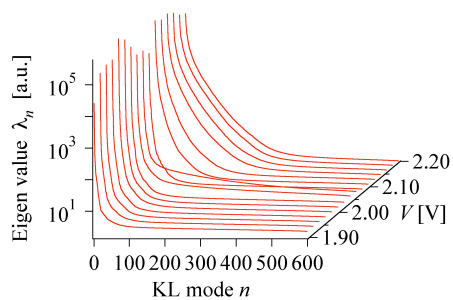


図 14 固有値分布の電圧変化

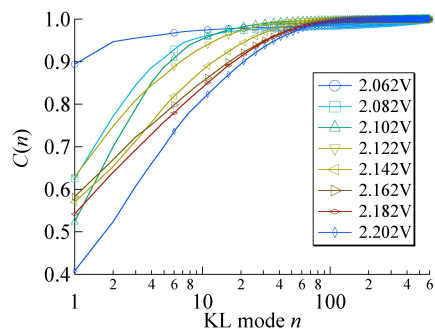


図 15 再構築画像との相関 $C(n)$

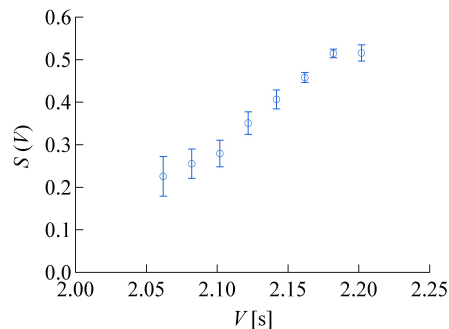


図 16 大域エントロピー S の電圧変化

動的花弁領域での相互相関 $C(n)$ を図 15 に、大域エントロピー S の電圧変化を図 16 に示す。電圧の増加と共に揺らぎは大きくなるが、揺らぎの情報の 90% は 20 個以下の KL モードに属することがわかった。時空カオス状態の複雑さを表す大域エントロピーは最大でも 0.6 程度であり、完全な無秩序状態である $S=1$ の状態からはるかに離れており、相関がかなり残っている時空カオスであることがわかった。なお、このカオス状態において、カオス同期の実験を試みたが、購入した 2 つの同一型 LCLV 素子の特性が僅かに異なるために完全に同一なカオス状態が得られず、カオス同期が困難であることがわかった。

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 5 件)

① Tomoyuki Nagaya, Tadaaki Yamamoto, Touru Asahara Shigetoshi Nara and Stefania Residori Dynamics of the Petal-like Patterns in a Liquid Crystal Light Valve with Rotational Optical Feedback Mol. Cryst. and Liq Cryst (2009) to be published. 査読有り

② Yang-Ho Na, Tetsunori Shibuya, Seiji Ujiie, Tomoyuki Nagaya, and Hiroshi Orihara, Stripe formation in an immiscible polymer blend under electric and shear-flow fields, Phys. Rev. E 77(2008) 041405-1-041405-4 査読有り

③ Tomoyuki Nagaya, Tadaaki Yamamoto, Touru Asahara Shigetoshi Nara and Stefania Residori Nonlinear Dynamics of the Petal-Like Patterns in a Liquid Crystal Light Valve with Rotational Optical Feedback, J. Opt. Soc. Am. B 25(2008)74-82. 査読有り

④ Hiroshi. Orihara, Tetsunori Shibuya, Tomoyuki Nagaya and Seiji Ujiie, Topological Transition of an Immiscible Polymer Blend in Electric and Shear flow Fields, J. Phys. Soc. Jpn., 75(2006)063802-1-063802-4 査読有り

⑤ Tadaaki Yamamoto, Youhei Ookawa,

Tomoyuki Kitamoto, Tomoyuki Nagaya and Shigetoshi Nara

Bifurcation Phenomena in coupled Dynamic Self-electro-Optic-Effect Devices, Int. J. Bifurcation and Chaos, **16** (2006) 3717-3725. 査読有り

〔学会発表〕(計 14 件)

- ① 長屋智之, 池永暁弘, 奈良重俊, Stefania Residori, Karhunen-Loeve 展開による液晶自己組織化構造のゆらぎの解析, 日本物理学会第 2009 年年会, 日本物理学会, 東京, 2009, 3, 27-30
- ② 浜田裕貴, 小野澤晃, 長屋智之, 奈良重俊, Stefania Residori, 液晶空間光変調器におけるパターンダイナミクス II, 第 114 回日本物理学会九州支部例会, 日本物理学会九州支部, 福岡市, 2008, 12, 6
- ③ 長屋智之, 奈良重俊, Stefania Residori, 液晶光バルブにおける非線形パターンダイナミクス II, 日本液晶学会討論会, 日本液晶学会, 京都市, 2008, 9, 17-19
- ④ 長屋智之, 奈良重俊, Stefania Residori, Dynamics of the petal-like structure in a liquid crystal light valve with rotational optical feedback, International Liquid Crystal Conference 2008, International Liquid Crystal Comity, 韓国, 済州島, 2008, 6, 30-7-4
- ⑤ 長屋智之, 奈良重俊, Stefania Residori, Nonlinear dynamics of the petal-like structure in a liquid crystal light valve with rotational optical feedback, International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter, 京都, 2008, 6, 2-5
- ⑥ 長屋智之, 奈良重俊, Stefania Residori, 回転光フィードバック下の液晶光バルブにおけるパターン形成 V, 日本物理学会 2008 年年会, 日本物理学会, 東大阪, 2008, 3, 23-26
- ⑦ 長屋智之, 奈良重俊, Stefania Residori, 液晶光バルブにおける花弁状パターンのダイナミクス II, 科研費特定領域研究会第 2 回公開シンポジウム, 特定領域「ソフトマター物理」, 名古屋, 2008, 1, 7-8
- ⑧ 浜田裕貴, 長屋智之, 小野澤晃, 液晶空間光変調器におけるパターンダイナミクス, 第 113 回日本物理学会九州支部例会, 日本物理学会九州支部会, 大分, 2007, 12
- ⑨ 長屋智之, 奈良重俊, Stefania Residori, 回転光フィードバック下の液晶光バルブにおけるパターン形成 IV, 日本物理学会 2007 年年会, 日本物理学会, 札幌, 2007, 9, 21-24
- ⑩ 長屋智之, 奈良重俊, Stefania Residori, 液晶光バルブにおける非線形パターンダイナミクス, 2007 年液晶討論会, 日本液晶学会, 東京, 2007, 9, 12-14
- ⑪ 長屋智之, 液晶光バルブにおける自己組織化パターンのダイナミクス, 日本液晶学会 フォーラム

合同講演会, 日本液晶学会 化学フォーラム ソフトマターフォーラム, 別府, 2007, 5, 19

- ⑫ 長屋智之, 液晶光バルブにおける非線形パターンダイナミクス, 科研費特定領域「ソフトマター物理」第一回公開シンポジウム, 科研費特定領域「ソフトマター物理」, 東京, 2007, 3, 15-16
- ⑬ 長屋智之, 山本忠明, 浅原徹, 奈良重俊, Stefania Residori, 回転光フィードバック下の液晶光バルブにおけるパターン形成 II, 日本物理学会 2007 分科会, 日本物理学会, 鹿児島市, 2007, 3, 18-21
- ⑭ 長屋智之, 山本忠明, 浅原徹, 奈良重俊, Stefania Residori, 液晶空間光変調器における非線形パターンダイナミクス, 日本液晶学会討論会, 日本液晶学会, 秋田市, 2006, 9, 13-15

〔その他〕

本研究課題に関連して, ひらめき☆ときめきサイエンス〜ようこそ大学の研究室へ〜 KAKENHI 事業, 「体験しよう! 液晶の不思議な世界」を H21, 11, 1 に実施する。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長屋 智之 (NAGAYA TOMOYUKI)

大分大学・工学部・教授

研究者番号 00228058

(2) 研究分担者

奈良 重俊 (NARA SHIGETOSHI)

岡山大学大学院・自然科学研究科・教授

60231495 (2006, 2007 年度)

(3) 連携研究者

奈良 重俊 (NARA SHIGETOSHI)

岡山大学大学院・自然科学研究科・教授

60231495 (2008 年度)