

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26540129

研究課題名(和文) 2次元光双安定素子を用いたソリッドステートナチュラルコンピューティング

研究課題名(英文) Solid-state natural computing by two-dimensional optical bistable device

研究代表者

磯島 隆史 (Isoshima, Takashi)

国立研究開発法人理化学研究所・伊藤ナノ医工学研究室・専任研究員

研究者番号：40271522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ナチュラルコンピューティングの新たな実現法として、二次元的な広がりを持つ熱型光双安定素子における波面伝播を用いることを提案した。光をエネルギー源として動作する固体素子を用いるということでソリッドステートナチュラルコンピューティングと呼称する。その基本動作を有限要素法による数値シミュレーションと液晶を用いた試作素子による実験で確認し、迷路探索動作を実証した。この素子では、これまで真性粘菌のみで実現されていた縮退モードを、非生物系人工素子では初めて実現した。さらに外部フィードバックによる高機能化を検討し、不応フィードバックによりパルス化が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this project, we proposed to utilize wavefront propagation in two-dimensional opto-thermal bistable device for natural computing. We call it "solid-state natural computing", since the device is in solid state and utilize light as the energy source. We have demonstrated the basic function of the device by numerical simulation using the finite element method and by experiment using devices with liquid crystal. In addition, we demonstrated maze exploration, and found that this device presents the reduction mode that has been never realized by any natural computing device except for true slime mold. We also examined further functionalization with external feedback, and demonstrated that the refractory feedback can provide pulse operation.

研究分野：光物性物理

キーワード：光双安定素子 波面伝播 ポジティブフィードバック 相転移 熱拡散方程式 有限要素法 迷路探索

1. 研究開始当初の背景

シリコントランジスタの集積回路を基盤としたデジタルコンピューティングは、これまでムーアの法則と呼ばれる指数関数的な集積度の向上ともない急速な発展を遂げてきた。しかしながら、素子微細化の限界とそれに伴う動作速度向上や消費電力低減の限界が次第に見え始めている。さらに、解くべき問題の規模が大きくなるに従って計算量が爆発的に増えるNP問題などは本質的にデジタルコンピューティングでは対応できないと考えられている。このような壁を打ち破る可能性があるものとして、自然界に存在する様々な物理・化学・生物学的な現象を用いて情報処理を行うナチュラルコンピューティングが注目を集めている¹⁾。組み合わせ問題の1種である迷路探索は、真性粘菌の伸縮動作²⁾やペロゾフ・ジャボチンスキー反応波 (BZ反応=振動化学反応の一種)³⁾、あるいは界面活性剤を含む溶液中に浸漬した基板上を自発的に動き回る油滴の走化性 (pH勾配に沿って走る)⁴⁾などによって実現できることが、様々な研究者によって明らかにされてきた。しかしながらこれらの手法はいずれも、エネルギー源 (餌や化学物質) の枯渇によって動作が停止すること、物質移動に基づくため動作速度の著しい向上は見込めないこと、などの問題点があるため単純な原理検証実験に留まっており、複雑な情報処理には程遠く、ナチュラルコンピューティングの実用化の目処は立っていない。

代表研究者はこれまで非線形光学材料や素子の研究に携わってきたことから、このような問題点を解決するために光双安定性を利用するという発想に至った。

2. 研究の目的

本研究では2次元的な広がりを持った光双安定素子における2状態間の遷移領域の伝播 (波面伝播) を用いること (図1参照) を提案し、理論と実験によって波面伝播ならびにそれを用いた迷路探索などのナチュラルコンピューティング動作を実証することを目的とした。この素子では非線形光学応答や熱拡散といった固体の状態変化を用いるため、本研究ではこれをソリッドステートナチュラルコンピューティングと名付け、理論と実験によってその確立を目指した。

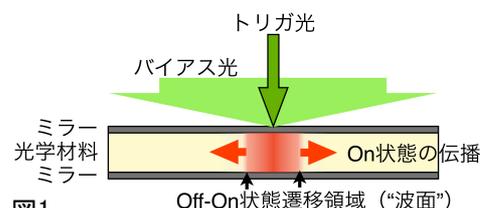


図1 2次元光双安定素子における状態遷移波面伝播の概念図



図2: 熱拡散型二次元光双安定素子の断面模式図

3. 研究の方法

光双安定性は、必ずしも光共振器構造を必要とはしない。光透過率と温度などとの間にポジティブフィードバックがかかるような構造であれば光双安定性は実現できる。そこで、図2に示すような、温度依存相転移材料 (液晶や低融点有機材料) と光吸収層の組み合わせによる単純な素子を考案した。例えば液晶5CB (4-cyano-4'-pentylbiphenyl) は約35°C以上では光散乱の大きなネマティック相、約35°C以下で透明な等方相となり、光透過率が大きく変化する。有機低分子材料eicosaneは融点が約32°Cであり、それ以下では多結晶で散乱が大きく高温では誘拐して透明となる。これらの層の下に黒い光吸収層を配置して透過光を熱に変換することにより、透過率増大→発熱量増大→温度上昇というポジティブフィードバックを形成できる。

このタイプの素子は、光共振器がないため白色光などでも動作し、またセル作製精度があまり高くなくともよい (セル厚依存性が小さい) という特長があるため、最初の動作原理検証に適している。このような素子について、以下のように研究を進めた。

(1) 熱伝導-温度相転移型素子の理論的シミュレーションと設計

熱拡散と温度依存透過率変化を組み入れた非線形偏微分方程式を有限要素法によって解いて、双安定状態遷移波面の伝播をシミュレーションした⁵⁾。隣接領域との熱のやりとりを示す拡散項に加えて光吸収による熱源項があり、これが温度依存光透過率 (ステップ関数やシグモイド関数などで近似) を通して非線形性を示す。有限要素法による数値計算⁶⁾はFreeFEM++⁷⁾を用いて行った。定常状態における温度分布から素子構造 (セルの厚さなど) や動作条件 (照射光強度や環境温度など) の影響を検討し、波面伝播検証実験に最適な素子構造と動作条件を決定した。また逐次法による状態分布の経時変化の計算から、波面伝播速度や空間分解能 (どのくらい小さな領域 - 例えば迷路の幅 - まだ動作しうるか)、縮退モードの条件などの検討を行った。

(2) パターン照射実験系の構築

高輝度型デジタルプロジェクタと縮小投影光学系を組み合わせることにより、約66×49mmの領域にSteinbockパターンと呼ば

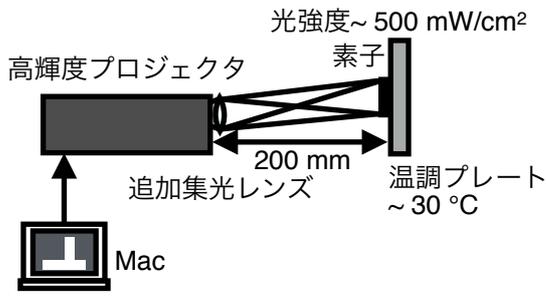


図3：パターン照射実験系

れる迷路パターン（後の図5）の光を投影できるシステムを構築した（図3）。この実験系で、最大光照射強度約0.5W/cm²を実現できることを確認した。これは後述するように、迷路探索に必要な光強度（ \sim 0.2W/cm²）を十分上回る。

(3) 熱拡散型素子の試作と動作検証

図2に示す構造の素子をいくつか試作し、(2)で構築した実験系を用いて、波面伝播の実験的検証を行った。

(4) 外部フィードバックによる高機能化の検討

外部フィードバックによって、システムに多様なダイナミクスを付与することができる。ここでは2次元光双安定素子のさらなる高機能化として、不応性フィードバックによる“On”領域のパルス化の検討を行った。不応性フィードバックとは、神経細胞における不応期（神経細胞が発火したのち、しばらく外部からの信号に応答しなくなる期間）にヒントを得たもので、2次元光双安定素子の各点において“On”状態への遷移をカメラによって検出したら、外部入射バイアス光をしばらくの期間十分弱くすることで“Off”状態へ引き戻すという外部からのフィードバックである。これによって、“On”状態の領域はパルス状になると期待され、神経系やBZ反応系類似の動作の実現が見込まれる。また、一般に遅延フィードバックによってカオスが容易に生起することが報告されている。そこで本素子においても遅延フィードバックを適用して時空間カオスの発生の可能性を数値シミュレーションで探った。

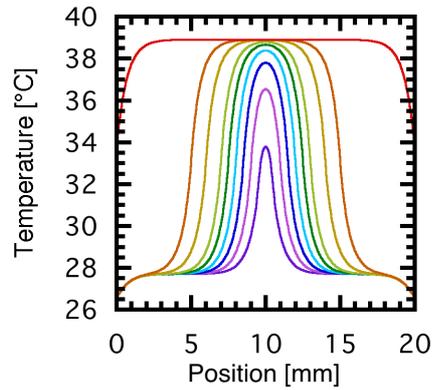


図4：定常状態における液晶層の温度の空間分布。素子幅20mm、光照射領域（経路）幅1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 20mm、照射光強度0.2W/cm²。

4. 研究成果

(1) 有限要素法による数値シミュレーション

まず素子断面の二次元空間で、実際に用いる材料の熱物性定数を用いたシミュレーションを行い、動作に必要な光強度が0.2W/cm²程度とビデオプロジェクタでも容易に実現できる強度であること、温度の面内分布から迷路経路幅は最小3mm程度まで設定しても問題ないこと（図4）、波面伝播速度は0.1mm/s程度とビデオカメラ等で容易に観察計測が可能であることを明らかにした⁶⁾。

さらに、三次元空間でもシミュレーションを行い、適切な条件を設定することにより、バイアス光照射領域に従ってOn領域が伝播することを確認した。その一例を図5に示す。この迷路パターンはSteinbock迷路と呼ばれるものである。このシミュレーションでは、迷路の経路を0.22W/cm²の光強度で、壁領域を0.15mW/cm²の光強度で照射するという条件下で、迷路形状の端部（図の左下）にトリガ光を照射した後の液晶層の温度分布の時間発展を計算したもので、時間とともにOn領域境界が迷路形状に沿って波面伝播していく様子がわかる。turn-on波面が迷路全域に行き渡ったのちに照射光強度を下げることによって、行き止まりの先端からon

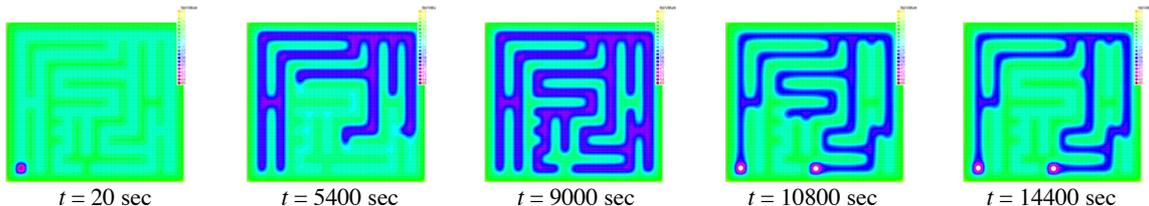


図5：Steinbock迷路探索のシミュレーション結果。迷路の経路部照射光強度は0.22W/cm²（伸長モード）ないし0.205W/cm²（縮退モード）、壁部照射光強度は0.15W/cm²、トリガ光強度0.40W/cm²、経路および壁の幅3mm、各図は左から動作開始20秒後（左下の始点をトリガ）、5400秒後、9000秒後（青いOn領域が全体に行き渡った状態、この時点で素子は縮退モードに入る）、10800秒後、14400秒後のスナップショット。緑が壁領域（30°C）、淡青色が経路領域（Off状態、34°C）、濃青色と紫色がOn領域（38°Cおよび45°C）を示す。伸長モードではOn領域波面が前進して全体に行き渡り、縮退モードに入ると行き止まり領域からの撤退が始まり、最終的に始点と終点を結ぶ正解経路（このSteinbock迷路では分岐して2本になった箇所が2つ存在する）のみがOn状態のまま残り、迷路探索が完了する。

領域が縮退していく縮退モード動作に切り替わり、最終的に始点と終点を結ぶ全経路のみがonとなって迷路探索が完了することを確認した(図5 $t=14400\text{sec}$)。この縮退モードは、照射光強度を適切に下げることにより、3方向が壁やoff領域(低温領域)に囲まれている行き止まり部は0n状態を維持できなくなりoffに遷移するが、前後が0n領域に挟まれた接続経路は0nのまま保たれる動作モードであり、真性粘菌を除く他のナチュラルコンピューティングにはない本方式独自のものである。

上述したように、伸長モードと縮退モードは照射光強度によって切り替えることができる。図6は数値シミュレーションによって得られた波面伝播速度と照射光強度の関係である。波面伝播速度は照射光強度によって連続的に制御可能であることがわかる。さらに、経路領域と壁領域の照射光強度平面上に動作モードをマッピングしたのが図7である⁸⁾。照射光強度が高すぎると、0n波面が伝播して来ていない状態でも自発的にturn onすることがある。T字型交差点では3方向に経路が繋がっているため熱の収支から温度が高くなる傾向があり、この自発

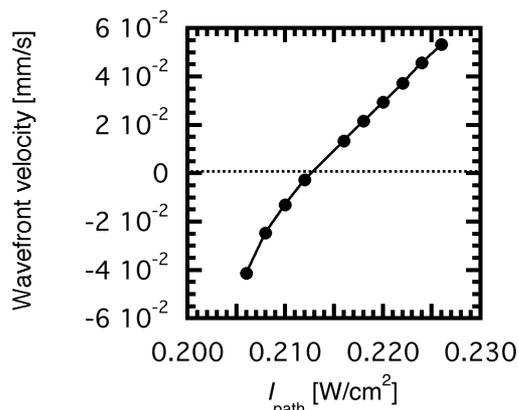


図6：波面伝播速度の照射光強度依存性。経路幅3mm、壁領域光強度0.15W/cm²。波面伝播速度が正の場合は伸長モード、負の場合は縮退モード。

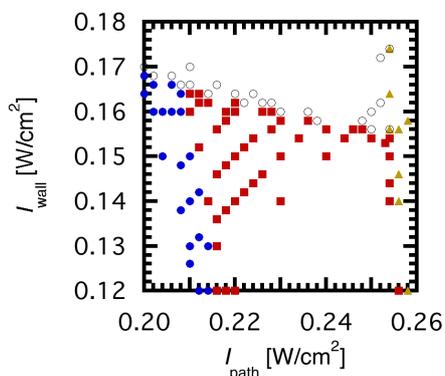


図7：2DOBDの動作モードマップ(相図)。青丸は縮退モード、赤四角は伸長モード、黄三角はT字交差点自発turn-onモード、白丸は壁侵蝕モード。経路幅3mm、横軸は経路の照射光強度、縦軸は壁の照射光強度。

turn-onがより低い照射光強度で起きる(T字交差点自発turn-onモード)。また、壁領域の照射光強度が高いと、周囲の経路領域が0nになるとそこからの熱で壁領域も0nに引きずり込まれる場合がある(壁侵蝕モード)。これらのモードは迷路探索には障害となるので、これらを避けるように照射光強度を設定する必要がある。

(2) & (3) 素子の試作と波面伝播実験

アクリル樹脂セルと5CBを用いた素子を試作した。黒色アクリル板の中央部を約0.2mmザグって上から透明アクリル板を被せてセル構造とし、液晶5CBを注入した(図8、中央の白っぽい部分が5CBのある領域)。この素子を用いて図3の実験系で基本動作の確認を行った。素子全面

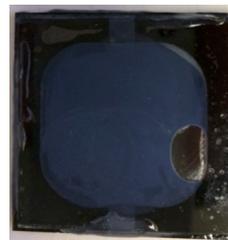


図8：試作した素子の一例。

あるいは一部を0.2W/cm²程度の光強度で照射し、トリガ箇所を高強度の光照射を行ってturn onを誘起することで、0n領域の波面伝播が生じることを確認した。波面伝播速度は0.08mm/sと概ねシミュレーションの結果と一致した。

さらに、単純な形状の迷路で波面伝播実験を行った(図9)。波面伝播は確認できたものの、素子動作条件の範囲が狭く、図中の左下領域で正常に波面伝播する条件では上部のT字型交差点で自発turn-onの傾向が見られるなど、面内での動作状態の不均一性が大きいという問題があった。これは、素子の作製精度上の問題もあるものの、プロジェクタの輝度の面内分布の不均一性の影響が大きいことが判明した。輝度分布の計測を行い補正をかける方法を検討している。



図9：迷路探索実験のスナップショット。淡白色部は照射光強度の低い壁領域、濃白色部は照射光の高い経路領域でoff状態の部分、黒い部分は0n状態の部分(液晶5CBが等方相で透明であるため下の黒アクリル板の色が見えている)。左下部にトリガ光を照射し、0n領域が経路に沿って広がっている。

(4) 外部フィードバックの検討

不応フィードバック下での2DOBDの動作を、素子断面の有限要素法シミュレーションで検討した。図10に示すとおり、不応フィードバックにより0n領域のパルス化が可能で

あることが確認できた。

また、遅延フィードバックによるカオス発生の検討も行った。しかしながらこれまでのところ、ある程度の不安定性が誘起されるものの、カオス性が確認できるまでには至っていない。

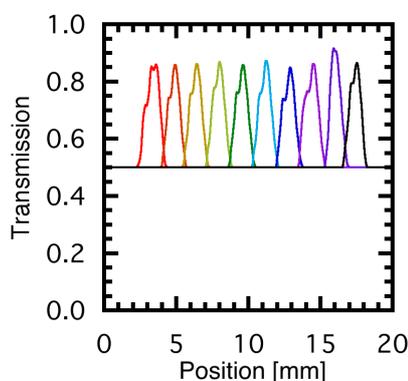


図10：不応フィードバック下でのパルス状0n領域の伝播の様子。不応時間5sec。各色は4secごとの光透過率分布のスナップショットで、左端の赤が最も早い時刻。パルス幅約1.0mm、伝播速度約0.39mm/sec。

以上述べて来たとおおり、本研究では二次元的な広がりを持つ熱型光双安定素子における波面伝播を用いた迷路探索を試み、基本動作を有限要素法による数値シミュレーションと試作素子による実験で確認した。素子動作条件や波面伝播速度は、シミュレーションと実験で概ね近い値となった。この素子では、これまで真性粘菌のみで実現されていた縮退モードを、非生物系人工素子では初めて実現した。粘菌ダイナミクスを用いた様々な情報処理機能が提案されているが、この二次元光双安定素子もそのような応用への展開が期待できる。

参考文献

- ① 磯島隆史, 青野真士, レーザー研究 43 (2015) 353.
- ② T. Nakagaki, H. Yamada, Á. Tóth, Nature, 407 (2000) 470.
- ③ O. Steinbock, Á. Tóth, K. Showalter, Science, 267 (1995) 868.
- ④ I. Lagzi, S. Soh, P. J. Wesson, K. P. Broune, B. A. Grzybowski, J. Am. Chem. Soc., 132 (2010) 1198.
- ⑤ Y. Okabayashi, T. Isoshima, E. Nameda, S.-J. Kim, M. Hara, Int. J. Nanotech. Mol. Comput., 3 (2011) 13.
- ⑥ T. Isoshima, Proc. NOLTA2017, (2017) 271; T. Isoshima and Y. Ito, Proc. NOLTA2014, (2014) 625.
- ⑦ F. Hecht: J. Numer. Math., 20 (2012), 251. 65Y15
- ⑧ T. Isoshima, Proc. NOLTA2018, (2018) in press.

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 3件)

- ① Isoshima, T.: "Control of wavefront propagation in two-dimensional bistable system", Proceedings of the 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2017), 査読無, 271-274 (2017).
- ② 磯島隆史, 青野真士: "ナチュラルコンピューティングの光システムによる実装", レーザー研究, 査読有, 43, 353-358 (2015).
- ③ Isoshima, T. and Ito, Y., "Two-dimensional Optical Bistable Device with External Feedback for Pulse Propagation and Spatio-Temporal Instability", Proceedings of Proceedings of the 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014), 査読無, 625-629 (2014)

[学会発表] (計 16件)

国際会議 7件 (うち招待講演2件)

- ① Isoshima, T.: "Control of wavefront propagation in two-dimensional bistable system", The 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2017), Cancun, Mexico, (2017.12).
- ② (招待講演) Isoshima, T.: "Organic Optical Bistable Device for Maze Exploration by Wavefront Propagation", International Conference on Polymers and Advanced Materials (POLYMAT2017), Huatulco, Mexico, (2017.10).
- ③ Isoshima T.: "Wavefront Propagation in Two-Dimensional Optical Bistable Device for Maze Exploration", XXXVII Dynamics Days Europe (DDE2017), Szeged, Hungary, (2017.06).
- ④ Isoshima, T.: "Wavefront Propagation in Two-Dimensional Optical Bistable Device under Patterned Light Irradiation", XXXVI Dynamics Days Europe 2016 (DDE2016), Corfu, Greek, (2016.6).
- ⑤ (招待講演) Isoshima, T.: "Wavefront propagation in two-dimensional optical bistable devices: introduction of external feedback toward chaos and spatio-temporal

instability”, 6th International Symposium on Chaos Revolution (6th ICR) / CodeBali 2015, Bali, Indonesia, (2015.9).

- ⑥ Isoshima, T.: “Wavefront Propagation in Two-dimensional Optical Bistable Device”, XXXV Dynamics Days Europe 2015 (DDE2015), Exeter, UK, (2015.9).
- ⑦ Isoshima, T. and Ito Y.: “Two-dimensional Optical Bistable Device with External Feedback for Pulse Propagation and Spatio-Temporal Instability”, 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2014), Luzern, Switzerland (2014.9)

国内学会 9件

- ⑧ 礒島隆史: “二次元光双安定素子を用いたナチュラルコンピューティング: 波面伝播制御と外部フィードバックによる高機能化”, 応用数理学会第14回研究部会連合発表会, 吹田, 大阪 (2018.03)
- ⑨ 礒島隆史: “二次元光双安定素子による迷路探索”, 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡, 福岡 (2017.09).
- ⑩ 礒島隆史: “(チュートリアル) ナチュラルコンピューティングと迷路探索”, 第23回「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」専門委員会研究会, 栗島, 新潟 (2017.07).
- ⑪ 礒島隆史: “光デバイスを用いたナチュラルコンピューティング”, 第12回理研「バイオものづくり」シンポジウム, 和光, 埼玉, (2017.3).
- ⑫ 礒島隆史: “迷路探索に向けた2次元光双安定素子における波面伝播”, レーザー学会学術講演会第37回年次大会, 徳島, 徳島 (2017.1).
- ⑬ 礒島隆史: “空間的広がりを持つ光双安定素子における波面伝播の三次元有限要素法シミュレーション”, 第2期第7回(通算23回) レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」専門委員会研究会, 石垣, 沖縄 (2016.11).
- ⑭ 礒島隆史: “二次元光双安定素子の試作と波面伝播実験”, 日本物理学会第71回年次大会, 仙台, 宮城 (2016.3).
- ⑮ 礒島隆史: “空間的広がりを持つ光双安定素子の試作と波面伝播実験”, 第2期第3回(通算16回) レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」専門委員会研究会, 宮古, 沖縄 (2015.11).
- ⑯ 礒島隆史: “空間的広がりを持つ光双安定素子における波面伝播と外部フィードバックによる時空間不安定化”, レーザー学会第11回「レーザーのカオス・ノ

イズダイナミクスとその応用」専門委員会, 宮古, 沖縄 (2014.10)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他] なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

礒島 隆史 (ISOSHIMA, Takashi)
国立研究開発法人理化学研究所
・伊藤ナノ医工学研究室・専任研究員
研究者番号: 40271522

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし