

平成21年 4月20日現在

研究種目：若手研究（A）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18684022  
 研究課題名（和文） フィードバック効果による孤立定在波の実現と情報処理への応用  
 研究課題名（英文） Stationary pattern by feedback effect and its application for image processing

研究代表者  
 氏名（ローマ字）：櫻井 建成（SAKURAI TATSUNARI）  
 所属機関・部局・職：千葉大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号：60353322

## 研究成果の概要：

「リズム」の発生とそれを基にし「かたち（パターン）」を形成する化学反応（BZ 反応）があります。本課題では、BZ 反応に光フィードバックを付加した系において、そのパターンの制御を行いました。また数理解析を行うためのモデルを提案し、パターンの安定性について議論しました。それらの知見をもとに、時間的・空間的に発展するパターンを用いた画像処理手法を提案し、生体視覚システムとの共通性を議論しました。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2007年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	10,100,000	3,030,000	13,130,000

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：非平衡・非線形物理学

## 1. 研究開始当初の背景

我々の目にふれるほとんどすべての事象は、マイクロからマクロに亘る多重の階層構造と、各階層で観測されるパターンの形成、発展、消滅、再生の反映として現れます。自然界の森羅万象に見られるいくつかの深遠な現象の理解は、こうした階層性に関連した情報の縮約と、各階層での情報の展開としての化学反応やパターン形成のダイナミクスを解明することにより得られると考えてい

ます。近年多くの研究者が、パターン形成のメカニズムや制御について、コンピュータを用いて数値的・理論的に研究しています。一方、散逸構造の代表的な例として知られる Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応は、TCA サイクルのような振動反応（化学時計）であり、生体神経を伝わるインパルスに似た化学反応波の伝搬を簡単に再現することができます。研究代表者は、生体組織のような興奮性媒体を構成することができる BZ 反応を用

いて、時間空間的秩序構造におけるフィードバック機構を利用した秩序構造の制御について実験・数値実験的に研究を行ってきました。具体的には、BZ反応に光刺激をもちいたネガティブフィードバック機構を加えることにより、化学反応レベルでの情報伝達（BZパケット）の粒子的伝播とその制御の可能性を示してきました。更に、BZパケットの分裂や衝突など、粒子（例えば電子など）と似た振る舞いをする事確認してきました。

## 2. 研究の目的

生体内の情報処理など多くの現象では、情報や信号の相互作用から成り立っています。そこでは、各階層での自己組織的秩序構造の制御が行われ、機能や知性が創発されます。機能や知性の創発には各階層を繋ぐ新しい仕組みが必要となります。本研究課題では、化学反応波パターン（新たな秩序形成）を通し、機能の創成（自己組織化秩序構造を用いた情報処理）に発展させることを目的としています。

## 3. 研究の方法

具体的研究方法として、下記に示す動的秩序形成の創成と制御の実験・数値実験などを行いました。

(1) チューリング条件を必要としない定在波、および、自己複製パターンの存在

従来用いていた光フィードバックシステム（図1）は、光コントラスト比が弱く、時間・空間分解能が低く、複雑な化学反応波パターンの制御は難しかった。そこで、光学レンズを用いた空間分解能の改善や高速カメラを用いた時間分解能の改善を行い、定在波の実現を目指しました。

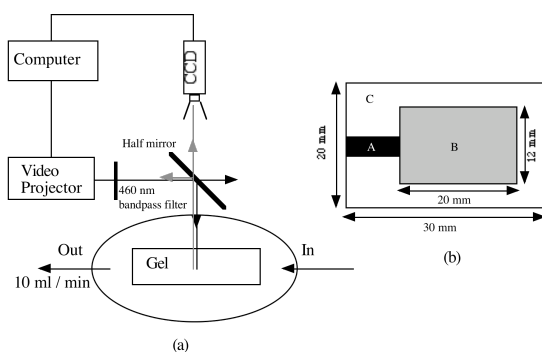


図1：カメラ、液晶プロジェクター、コンピュータで構成されたリアルタイム光フィードバックシステム

(2) 動的パターン形成の曲率方程式を用いた安定性解析

図2に示すような、光フィードバック効果を取り入れた反応拡散パターン制御の安定

性に関する理論的解析は行われていませんでした。そこで、研究代表者は、曲率方程式にフィードバック項を付加した下記モデルを提案しました。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \left\{ \int_0^L kV d\xi \right\} + G \frac{\partial k}{\partial l} = -kV - \frac{\partial^2 V}{\partial l^2}$$

$$\frac{dL(t)}{dt} = \int_0^L kV dl + G + \mathcal{O}'$$

しかしながら、数値実験、及び、線形安定性解析の範囲では、実験結果を十分説明することができず、今後モデルの改良を行う必要がありました。そこで、図2に示すパターンの特徴がパターンの端にあると考え、新しい境界条件を付加した、新しいモデルを提案しました。そのモデルによる数値実験と解析を行います。

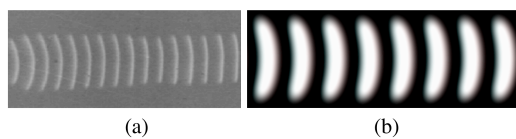


図2：光フィードバックにより実現された一定な大きさを持つパターンの例。(a) 図1の装置を用いて得られた実験結果。(b) 数値計算の結果

(3) 自己組織化パターンによる画像処理の提案と確率共鳴による新しい情報処理手法の提案

自己組織的に発生するパターンを利用した画像処理手法の提案を行いました。具体的には、空間に散りばめられた各々の非線形素子を線形結合させてモデル（離散的結合振動子モデル）を提案しました。そのモデルを用いた数値計算を行いました。

## 4. 研究成果

(1) チューリング条件を必要としない定在波、および、自己複製パターンの存在

① Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応系における大域的フィードバックによる孤立波の実現

大域的フィードバックを付加したモデルにおいて、数値計算により定在する化学反応波（図3(b))を発見し、その定量的な特徴を明らかにしました。また、新たに構築した光フィードバックシステムを用いて定在波（孤立する性質を持つパターン形成）の実現の可能性を探りました。そこでは、大域的フィードバックは抑制因子の大きな拡散に対応することを見いだしました。また、この孤立している定在波は、伝搬するモードと定在するモードが、同じパラメータで存在することが示され、ヒステリシスを持っていることが分かりました。

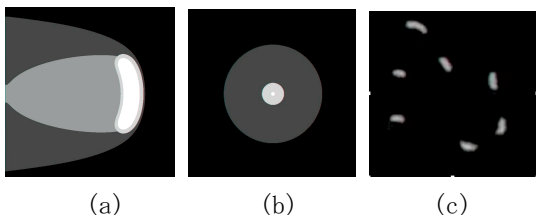


図3：数値計算結果。(a)一定の大きさ伝搬する化学反応波。図2に対応する。(b)定在する化学反応波。(c)分裂する化学反応波。

## ②非局所フィードバックによる自己分裂パターン

従来、BZ 反応のような非チューリング条件下では、自己分裂パターンは発生しないと考えられています。しかしながら、非局所光フィードバック効果により、BZ 反応系においても自己分裂パターンが発生することを示しました (図3○)。大域的結合、非局所結合、局所結合を统一的に議論するための実験系を提案しました。

## (2) 動的パターン形成の曲率方程式を用いた安定性解析

光フィードバックパラメータに対する化学反応波の大きさ定量的測定を行いました (図4)。

その結果や図2の結果を基にした、新たに提案したフィードバック付き曲率方程式を用いた数値実験結果を図5に示します。線の長さが変わらず、線が一定速度で伝搬している様子を再現しています。また、フィードバックパラメータ ( $\phi$ ) に対する線 (化学反応波に対応) の長さ (大きさに対応) を図6に示します。図5より、実験結果 (図2) に対応した線の形が再現できたことが分かります。また図6より、フィードバックパラメータ ( $\phi$ ) に対する線の長さが実験結果 (図4) と良く対応していることが分かります。ライン ( $\phi_{2D}$ ) の左の領域では、化学反応波は時間とともに大きくなり、右側の領域では、小さくなり最終的には伝搬を維持できなくなることを示すことができました。この結果は、研究代表者の実験結果を再現するとともに、他の研究者による実験結果をも良く再現しています。これより、提案した曲率方程式は現象を良く捉えていると考えられます。

曲率方程式を扱う利点は、化学反応波の内部の情報 (曲率や端点での伝搬方向) が陽に扱えることであります。本研究課題で提案した曲率方程式を用いた数値計算 (図7) では、その線の端点の接線方向速度成分 ( $G(t)$ ) と法線方向速度成分 ( $V(0, t)$ ) を知ることができます。線の長さが一定の場合には、端点の接線方向速度成分 ( $G(t)$ ) が負になることが分かりました。この特徴は化学反応波が一定の大きさを保ったまま伝搬するための条件と

なること推測されます。

さて、上記までに化学反応波の端点の新しい記述を提案しました。時間的・空間的ノイズに対するパターンの安定性もこのフィードバック付き曲率方程式を用いれば議論できると考えています。具体的には、フィードバック項の代わりに時間的・空間的ノイズを加えた数値実験、および、解析を行うことが可能です。イズ効果に対する、パターンの安定性を議論することは今後の課題です。

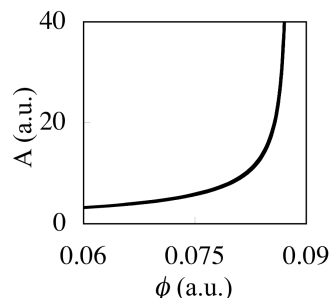


図4：光フィードバックパラメータに対する化学反応波の大きさ (図2に対応)



図5：新たに提案した曲率モデルによる数値実験結果。

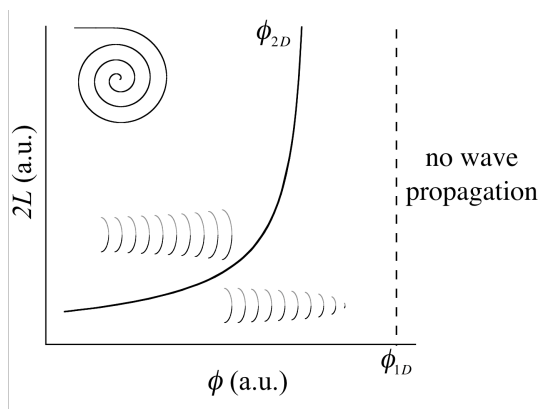


図6：フィードバックパラメータ ( $\phi$ ) に対する線の長さ。

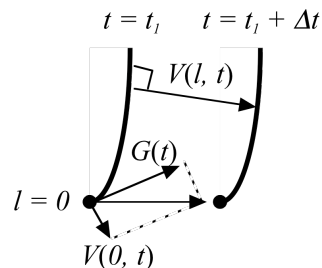


図7：線 (化学反応波) の端点での振舞い。左の線が  $\Delta t$  秒後に形を変えず右の線まで移動する。

(3) 自己組織化パターンによる画像処理の提案と確率共鳴による新しい情報処理手法の提案

反応拡散系を用いた情報処理手法として、素子間を離散化することにより始めて現れる秩序構造において、その安定性を解析的、数値計算的に示しました。その結果を図8に示します。図8(a-1)は入力信号です。また、(a-2)、(a-3)、(a-4)はその後の時間発展を示します。(a-4)の後には同じ形を保ったままでした。このことは、入力信号の輪郭だけを抽出したパターンが定在することを利用した画像処理が実現できたことを示しています。図8(b)はノイズを含んだ画像を入力信号として与えた結果です。(a)と同様に輪郭だけを抽出しており、ノイズの影響を抑えています。このことは、輪郭抽出とノイズ除去を同時に行うことができることを示しており、従来の画像処理手法より優位な点です。

次に、低輝度値をもった四角形を入力信号とした結果を図9に示します。図(n=0)は、ノイズがない場合の結果です。入力信号の輝度値が小さいため、その輪郭が抽出できません。図(n=0.1)は、ノイズ強度が0.1の場合の結果です。ノイズがのっているものの、入力信号の輪郭が抽出できていることがわかります。図(n=0.15)は更にノイズ強度を大きくした結果です。入力信号の輪郭が抽出できるものの、入力信号以外の箇所にも出力信号がでており、SN比が悪い。図(n=0.2)は更にノイズ強度を大きくしたときの結果です。入力信号を検出できていません。この結果より、本手法を用いた画像処理において、低輝度の入力に対して、適度なノイズの付加により信号検出能力を上げることがわかりました。これは、従来提案されていた輪郭抽出手法にはない特徴である。

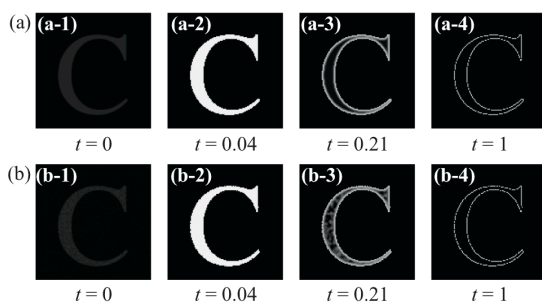


図8：反応拡散系を用いた画像処理

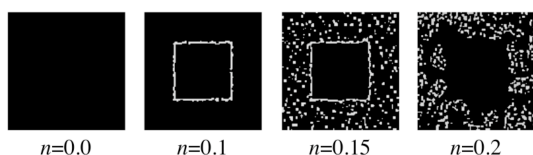


図9：ノイズを利用した低輝度値入力信号の検出結果。

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 N. Kurata, H. Kitahata, H. Mahara, A. Nomura, H. Miike, and T. Sakurai, Stationary pattern formation in a discrete excitable system with strong inhibitory coupling, Physical Review E, 掲載決定済、査読有
- ② T. Sakurai, K. Osaki, and T. Tsujikawa, Kinematic model of propagating arc-like segments with feedback, Physica D, Vol.237 pp.3165-3171 (2008), 査読有.
- ③ T. Sakurai and K. Osaki, Dynamics of Chemical Wave Segments with Free Ends, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations, Vol.13 pp.1067-1076 (2008), 査読有.
- ④ N. Kurata, H. Mmahara, T. Sakurai, A. Nomura, and H. Miike, Image processing by a coupled non-linear oscillator system, Proc. 23rd Int. Tech. Conf. on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2008), pp.553-556 (2008), 査読無.

[学会発表] (計8件)

- ① T. Sakurai, Computing with Chemical reactions, 3rd Int. Workshop on Natural Computing, 2008年9月23日, 神奈川県横浜市
- ② T. Sakurai, Onset and stability of stationary pattern in a spatially discrete excitable system, Czech-Japanese Seminar in Applied Mathematics 2008 (CJS2008), 2008年9月1日, 宮崎県高千穂町
- ③ T. Sakurai, Kinematic model for stabilized chemical wave, Mini workshop on pattern formation in reaction diffusion system with advection, 2007年9月12日, チェコ・プラハ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

櫻井 建成 (SAKURAI TATSUNARI)  
千葉大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：60353322

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし