

平成 22 年 5 月 14 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間： 2007～2009

課題番号：19540407

研究課題名（和文） 反応拡散系のパターン形成と制御

研究課題名（英文） Pattern formations and control in reaction-diffusion systems

研究代表者

坂口 英継（SAKAGUCHI HIDETSUGU）

九州大学 大学院総合理工学研究院・准教授

研究者番号：90192591

研究成果の概要（和文）：

反応拡散系やギンツブルグーランダウ方程式に現われるパターン形成の研究を推し進めるとともに、さまざまな外力項や制御項を加えることによりパターン形成を制御する。それらを心臓の不整脈の除去法や原始細胞の形成などの生体系などへ応用することを試みる。

研究成果の概要（英文）：

Pattern formation is studied in various types of reaction-diffusion systems and Ginzburg-Landau systems, and the pattern formation is controlled by using various types of external forces and feedback terms. We try to apply the control method of pattern formation to various biological systems such as the defibrillation in cardiology and the creation and splitting of protocells.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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

非線形物理学の分野では、カオス、フラクタル、ソリトンとらんでパターン形成が大きな研究テーマとなっている。反応拡散系でのパターン形成としては空間周期パターンが出現するチューリングパターンや BZ 反応系でのスパイラルパターンがよく知られている。熱帯魚の皮膚の模様をチューリングパ

ーンで解釈できるという研究などがある。心臓の心室頻拍や心房細動と呼ばれる危険な不整脈では心臓内を興奮波がスパイラル状に旋回しているといわれている。また、複素ギンツブルグーランダウ方程式は時空カオスをはじめ多様なパターンを形成することが知られている。複素ギンツブルグーランダウ系を用いて時間遅れのフィードバック項

を付けることにより時空カオスから規則的なパターンへ制御することなどが世界的にもいくつかのグループで研究されていた。

2. 研究の目的

今回の研究課題では、反応拡散系や複素ギンツブルグーランダウ方程式に現われるパターン形成の研究をさらに推し進めるとともに、さまざまな外力項や制御項を加えることにより、パターンを制御することを目的とする。さらにそれらの系を生体系などへ応用することを試みる。

3. 研究の方法

反応拡散系や複素ギンツブルグーランダウ方程式系などの計算機シミュレーションの結果のパターンを観察する。外力項やフィードバック制御項をこれらの方程式系に付け加え、その応答を研究する。

4. 研究成果

さまざまな反応拡散系や複素ギンツブルグーランダウ型の方程式の数値計算を行いさまざまな研究結果を得た。

- (1) 散逸構造の振幅方程式として知られている複素ギンツブルグーランダウ方程式は散逸がない極限では非線形シュレディンガー方程式になる。非線形シュレディンガー方程式は光ソリトンなどを記述する方程式である。1次元非線形シュレディンガー方程式のソリトン解はよく知られているが、外部ポテンシャルなどが入ったり、2次元以上になると解けなくなる。時間を虚数化すると、実のギンツブルグーランダウ方程式に戻るが、通常のギンツブルグーランダウ系ではそのノルムは保存しない。ノルムを保存するようなフィードバック制御項を付けたギンツブルグーランダウ方程式系を数値計算することにより、ソリトン型の解が力学系のアトラクタとして、時間発展の結果自然に現われることを示した。この方法により外部ポテンシャル中の2次元ソリトンや渦型解が容易に得ることができるようになった。(学会発表)
- (2) 液晶対流系では非常に多様なパターンが現れる。理論的にはギンツブルグーランダウ型のモデル方程式で解析されることが多い。論文では液晶対流系に見られるシェブロンと呼ばれる杉綾模様の研究をした。液晶のディレクターのモードと対流モードの結合の結果、杉綾模様が自然に出現することを示した。また、偏微分方程式系から3自由度にまで自由度を低減させた連立常微分方程式系でシェブ

ロンパターンが説明できることを示した。

- (3) 論文では、液晶対流系での見られるソフトモード乱流に関連した、Matthews-Cox方程式と呼ばれる偏微分方程式系の研究を行った。この系では時空カオスが空間的に一様ではなく、大域的な構造をもつことを示した。すなわち、一様な時空カオス状態が不安定化し、時空カオス状態とゼロ状態に相分離することを示した。時空カオスの上に新たな非自明な構造が自発的に形成されるという興味深い系となっていることが分かった。
- (4) 論文では細胞レベルでのカルシウムダイナミクスが形成するスパイラルパターンの研究を行った。カルシウム振動やカルシウム波動は細胞レベルでの情報伝達に重要な役割を果たしていることが知られている。ここでは媒質の性質が異なる界面に興奮性の平面パルス波動は入射すると、カオス的な波動になり、カオスの不安定性のために波動の平面性が不安定化し、スパイラル波動が形成されることを示した。この研究はカメルーンのWoaf教授との共同研究である。
- (5) 論文では心臓の興奮の数理モデルとしてよく知られているLuo-Rudyモデルに交流外力を加えることで、パルス波動やスパイラル波動をうまく消去できることを示した。交流の振動数をパルスの脈動の振動数の近くに制御することにより、ある種の共鳴現象が起こり、パルス自体が崩壊するものと考えられる。この現象を重篤な不整脈である心室頻拍に対する痛みの少ない除細動法として応用できないかと考えている。この研究は、九州大学健康科学センターの丸山准教授との共同研究である。
- (6) 論文は、生体細胞の起源を模擬して、半透性の膜に包まれたセル内の反応拡散系を研究した。さらに、分子数の有限性を考慮して、確率的な反応モデルを考えた。セル内の化学反応によって膜の構成成分が合成される。一方、膜の半透性により、細胞外から栄養分が取り込まれ細胞内に有用な活性分子が蓄積される。この互いに持ちつ持たれつの関係性を持った細胞状態が、なにもない一様状態からゆらぎによって創発されることを数値シミュレーションで示した。これは原始細胞の誕生モデルと解釈できるかもしれない。
- (7) 論文では発生過程での細胞の分化への応用を考えた。チューリングモデルを拡

張した互いに競合しあう2因子系を考える。この2つの因子は長距離的には互いの生成を促進しあうというモデルを考えた。この相互作用距離が十分大きいと、系が自発的に二分割され、それぞれの領域では別の因子が活性化している。この現象は2つの因子を遺伝子の活性状態と考えると、2つの細胞群に分化した状態と解釈できる。この領域の面積比が系のパラメータで一意的に決定されることが分かった。これは発生生物学で見られる比率制御に対応している。さらにこの系をカスケード的に重ねた系の数値計算を行い、大きなスケールから小さなスケールへと領域がカスケード的に分化が繰り返されることも示した。動物の発生においても、一様な卵から、外胚葉、内胚葉に分かれ、外胚葉は皮膚や神経系に分化し、神経系がさらに脳、脊髄などにカスケード的に分化していくことに対応していると解釈できる。

- (8) 論文 では原始細胞の分裂を模した数値計算を行った。実際の細胞分裂では、遺伝子に制御されてアクチン系などが能動的に働き分裂が進むが、ここでは、周長と面積を制御したミセル系を記述するギンツブルグ-ランダウ型モデルの数値計算を行った。面積を一定にし、周長を大きくすると、丸い細胞状の構造がある臨界値でまず扁平化し、さらにパラメータを上げていくと、2つに分裂することが分かった。さらにパラメータを上げ続けると、細胞分裂が進み、細胞数が増えていくことも分かった。原始細胞でも膜の構成成分が増加してゆくと自然に細胞分裂が生じることが起こったと考えられる。実際、ベシクルやミセルを用いた化学反応系でベシクルやミセルの分裂や増殖が実験でも観察されて、人工細胞の研究が盛んにありつつある。

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9件)

H.Sakaguchi and R.Baba
Charging dynamics of the electric double layer in porous media
Physical Review E, Vol.76,2007
artno.011501
H.Sakaguchi and D.Tanaka
Global structure in spatio-temporal chaos of the Matthews-Cox equation
Physical Review E, Vol.76, 2007
artno.025201

H.Sakaguchi
Soliton turbulence in the complex Ginzburg-Landau equation
Physical Review E, Vol.76, 2007
artno.0107205
H.Sakaguchi and P.Wofo
Chaotic pulse transmission and spiral formation in a calcium oscillation model
Physical Review E, Vol.77,2008
artno.042902
H.Sakaguchi and T.Maruyama
Elimination of pulses and spirals by external forces in Luo-Rudy model
J. of the Physical Society of Japan
Vol.77,2008, artno.084801
H.Sakaguchi
Creation and reproduction of model cells with semi-permeable membrane
J. of Physical Society of Japan
Vol.78, 2009, artno.014801
H.Sakaguchi and A.Matsuda
Chevron patterns and defect lattices in an anisotropic model for electroconvection
Physica D, Vol.238, 2009,1-8
H.Sakaguchi
Ratio control in a cascade model of cell differentiation
Physical Review E, Vol.79, 2009
artno.051916
H.Sakaguchi
Splitting instability of cellular structures in the Ginzburg-Landau model under feedback control
Physical Review E, Vol.80, 2009
artno.017202

[学会発表](計4件)

坂口英継
樹枝状結晶の横枝競合成長の数理モデル
日本物理学会 2007年9月 札幌
坂口英継
フィードバック制御法によるソリトン型や渦型解の数値計算
日本物理学会 2008年9月 盛岡
坂口英継
細胞分化のカスケードモデルと比率制御
日本物理学会 2009年9月 熊本
坂口英継
1次元周期ポテンシャル中の協力的ジャンプ運動
日本物理学会 2010年3月 岡山

6 . 研究組織

(1)研究代表者

坂口 英継 (SAKAGUCHI HIDEISUGU)

九州大学・大学院総合理工学研究院・

准教授

研究者番号：90192591