

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560444
 研究課題名（和文） 確率システム制御理論に基づく生物の自己組織化制御とその応用
 研究課題名（英文） Control of the Self-organization of Biological System based on the Stochastic Systems Control Theory and Its Application
 研究代表者
 石川 昌明 (ISHIKAWA MASAOKI)
 山口大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：30201916

研究成果の概要（和文）：生態系における生物の自己組織化現象として(i)大腸菌のようなバクテリアによるコロニー形成過程，(ii) 魚群を考慮したプランクトン系におけるコロニー形成過程，(iii) 感染症伝播に伴う感染者コロニー形成過程の3種類の自己組織化過程の確率モデルを提案し，カオスの時空間パターンなど種々の時空間パターンが自発的に形成される過程と外乱の影響をシミュレーション解析により明らかにした．さらに，確率システム制御理論を応用して，自己組織化現象制御のための基礎を確立した．

研究成果の概要（英文）：As the self-organization phenomena in ecosystems, we have studied three phenomena: (i) bacterial colony formation, (ii) colony formation of plankton system with fish school and (iii) colony formation of infectives in the infectious disease spreading. We have proposed the stochastic models for these three self-organization processes and have analyzed the spatio-temporal pattern formation, and clarified the influence of the random fluctuation on the self-organization. Moreover, with help of the stochastic control theory, we have constructed the basis of control of the self-organization processes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：確率システム制御理論，確率反応拡散方程式，時空間パターン，生態系，感染症，捕食者・被食者系，シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

自己組織化現象は工学の諸分野において観測され，その解析・制御が次世代産業発展の基盤をなすと考えられている．例えば，現在の最先端機器は超精密微細加工に基づいた

部品のマイクロ化技術に支えられている．しかし，従来の加工技術は外部から強制的に材料に圧力や熱を加えて，加工する技術であるため，必然的に材料内部にひずみ・欠陥が生じ，超精密微細加工には適していない．このよう

な技術的障害を克服するため、材料固有の形態・構造を自発的にとる自己組織化現象を利用した加工制御技術の開発が必要不可欠となってきた。そこで、本研究では一般的な自己組織化現象制御のための基礎理論を構築し、次世代産業を支える基礎理論・技術確立を目的とする。特に、本研究では自己組織化現象として人をはじめとしてバクテリア・プランクトンのような生物の自己組織化に着目し、その解析・制御を確率制御理論の立場から研究する。

2. 研究の目的

バクテリア・プランクトンの自己組織化に関して、国内外では既にいくつかの研究が成されているが、従来の研究はすべて増殖率の揺らぎや媒体内の不純物などの影響を考慮しない確定モデルによる解析であり、さらに制御に関しては特定のモデルに対する近似集中システムによる数値的制御であり、厳密さに問題があり、かつ理論的に制御システムを構築した研究でもない。したがって、実際問題への応用を考えれば従来の研究成果では不十分である。さらに、現実の自己組織化現象には種々の物理量に不規則な揺らぎが生じるため、厳密な解析のためには確率偏微分方程式によるモデル化が不可欠である。このような観点から生態系における生物の自己組織化過程の確率モデルを提案し、不規則外乱の自己組織化過程への影響を解析し、さらに提案した確率モデルに確率システム制御理論を適用し、自己組織化制御システム構築の基礎を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 生物の自己組織化過程の確率モデルの構成：バクテリア・プランクトン・感染者の自己組織化による集合体形成過程のモデリングを行った。バクテリア・プランクトンなどの密度変化の時間的・空間的揺らぎや環境変化の影響を考慮し、自己組織化過程を確率解析に基づいて確率反応拡散方程式としてモデル化した。

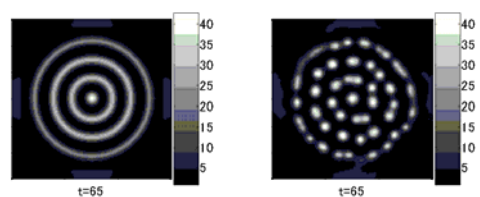
(2) 外乱の自己組織化への影響解析：有限差分法を提案した確率モデルに用い、不規則外乱が自己組織化により形成される時空間パターンに及ぼす影響をシミュレーション解析により明らかにした。

(3) 生物の自己組織化制御系の基本設計：バクテリア、プランクトン、人口密度分布を状態変数とし、規定の密度分布との2乗誤差制御入力 u の2乗からなる2次評価関数を設定し、最適制御問題を考える。すなわち、自己組織化制御問題を非線形確率分布システムの最適制御問題として定式化し、確率最大原理を

用いて最適制御系の設計を行う。

4. 研究成果

(1) 生物の自己組織化としてバクテリアの自己組織化による有機能集合体(バクテリアコロニー)形成過程を考え、特に大腸菌(*E. coli*)のように誘因物質の濃度勾配を検出し、自分自身で移動方向を決定できる走化性をもつバクテリアの自己組織化を考察した。バクテリア密度変化の時間的・空間的揺らぎや媒体化学物質中の不純物の影響を考慮し、走化性を取り入れた確率反応拡散方程式として、走化性バクテリアの自己組織化過程の確率モデルを提案した。提案した確率モデルによるシミュレーションを行い、提案モデルの有効性を検証した。さらに、外乱のコロニー形成への影響についても明らかにし、外乱がコロニー形成を促進する働きをすることを明らかにした。外乱のコロニー形成過程への影響として図1のように外乱の有無によってコロニー形状が異なる場合があることも示した。図1はネズミチフス菌の密度分布を白黒表示したものであり、白い部分が密度が高い領域を示す。



(a) 外乱なし (b) 外乱あり

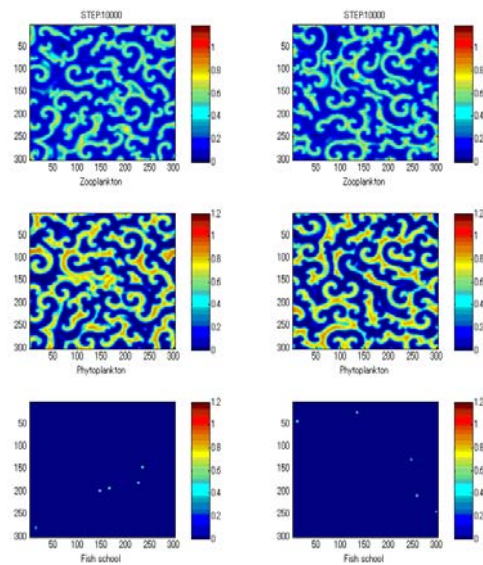
図1：ネズミチフス菌のコロニー

誘因物質濃度分布を制御することによってバクテリアの移動を制御することによりコロニーの自己組織化を制御する方法について考察した。誘因物質とバクテリア密度をそれぞれ制御入力、状態変数として、内部のバクテリア密度分布が規定のバクテリア分布との2乗誤差制御入力の2乗からなる2次評価関数を設定し、最適制御問題を考察した。すなわち、バクテリアの自己組織化制御問題を非線形確率分布システムの最適制御問題として定式化し、確率最大原理を用いて最適制御系の基本設計を行った。

(2) 生態系の食物連鎖における自己組織化現象の解析：植物・動物プランクトン、魚によって構成される捕食者・被食者系における自己組織化現象について天候などの環境の変化に起因する増殖率の不規則な揺らぎを考慮した確率モデルを提案した。提案した確率モデルを用いて、プランクトンの自己組織化による時空間パターン形成に及ぼす影響をシミュレーションによって考察した。その

結果、魚の捕食率がホップ分岐点より不安定側でかなり小さいかあるいは安定側にある場合は不規則揺らぎの自己組織化への影響は小さく、ホップ分岐点の不安定側で分岐点に近い場合はその影響が大きいことが分かった。

さらに、植物・動物プランクトンと魚群から構成される捕食者・被食者系において、複数の魚群が領域内を移動する場合を考え、魚群の大きさ、数、移動によって、螺旋状の時空間パターンが形成されることを明らかにした。この螺旋状の時空間パターンは、外乱の影響を受けにくく、BZ反応におけるスパイラルパターンのような非線形現象特有の構造であることも示した。魚群を考慮したプランクトン系では図2に示したように外乱の有無に関係なく、プランクトン密度分布は螺旋状のコロニーを自発的に形成することが分かった。図2(a),(b)の左右は外乱のない場合とある場合のシミュレーション結果であり、上、中、下段はそれぞれ植物プランクトン、動物プランクトン、魚群の密度を表したものであり、赤い領域は密度が高い領域を示している。

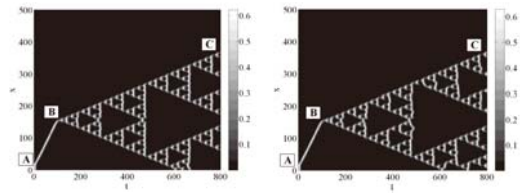


(a) 外乱なし (b) 外乱あり
図2：魚群を考慮したプランクトン系におけるプランクトンのコロニー

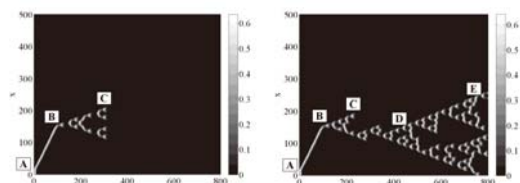
(3) 生物個体群における感染症伝播に伴う自己組織化現象の解析：

個体数が少ないときに増殖率が負となる強アリー効果を考慮した感染者・未感染者モデルにおける感染者密度分布、未感染者密度分布の時空間挙動を解析した。その結果、ア

リー効果強度、感染者死亡率、拡散効果の相互作用により、図3に示したように密度分布の時空間パターンがシェルピンスキーガasket上のフラクタル構造を自己組織的に形成する場合があることが分かった。図3は感染者密度分布をその値に応じて白黒表示した図であり、白い領域は密度の高い領域を示している。また、図4に示したように増殖率の揺らぎにより、感染者密度分布の時空間パターンが異なる場合があることも分かった。自己組織化によるパターン形成への外乱、感染者死亡率、アリー効果の相互影響を明らかにした。



(a) 外乱なし (b) 外乱あり
図3：感染者密度の自己組織化 I



(a) 外乱なし (b) 外乱あり
図4：感染者密度の自己組織化 II

拡散効果、アリー効果、感染者死亡率の相互作用により、感染症伝播過程が進行パルス、振動進行パルス、分裂進行パルス、分裂振動進行パルスなどの多様な挙動を示し、特に分裂(あるいは分裂振動)進行パルスではある狭いパラメータ領域において感染者(感受性者)も密度分布がシェルピンスキーガasket状の時空間的フラクタル構造を自己組織化することをシミュレーションによって示した。

確率最適制御理論を応用し、時空間パターン制御のための基礎を確立した。

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 9 件)

- ① M. Ishikawa, On the Simulation Analysis in the Stochastic Endemic Model with Vaccination, Proceedings of the 41st ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, (査読有), 2010, 135-139.
- ② M. Ishikawa, On the Spatio-temporal Structure in the Stochastic Diffusive SI

- Model, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, (査読有), Vol.6, 2010, 63-73.
- ③ M. Ishikawa, Behavior Analyses of Stochastic Predator-prey Systems under Fish Predation, Proceedings of ICCAS SICE 2009, ICROS SICE International Joint Conference, (査読有), in CD-ROM, 2009.
- ④ M. Ishikawa, Stochastic Modeling of Epidemic Spreading under Random Fluctuations and Simulation Analyses of Traveling Waves, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, (査読有), Vol.5, 2009, 67-74.
- ⑤ M. Ishikawa, Simulation Analyses of Spatio-temporal Patterns formed by Chemotactic Bacteria under Random Fluctuations, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, (査読有), Vol.5, 2009, 57-66.
- ⑥ 石川昌明, アリー効果を考慮した確率SIモデルにおける時空間パターン, 日本応用数学会 2009 年度 年会講演論文集, (査読無), 2009, 2-6.
- ⑦ M. Ishikawa, Influence of Random Uncertainties Complex Spatio temporal Patterns generated by Stochastic Predator prey Systems with Diffusion, Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control, (査読有), Vol.4, 2008, 25-34.
- ⑧ T. Tanabe, M. Ishikawa, Influence of the Random Disturbances on the Chemotactic Bacterial Colony Formations, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, (査読有), Vol.4, 2008, 25-34.
- ⑨ M. Ishikawa, Simulation Analyses of Behaviors of Spatially Extended Predator-prey Systems with Random Fluctuations, Advances in Electrical and Computer Engineering, (査読有), Vol.8, 2008, 2-6.

[学会発表] (計 7 件)

- ① M. Ishikawa, On the Simulation Analysis in the Stochastic Endemic Model with Vaccination, The 41st ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 2009 年 11 月 14 日, Hirao Memorial Seminar House, Konan University, Kobe, Japan.
- ② M. Ishikawa, Behavior Analyses of Stochastic Predator-prey Systems under Fish Predation, ICROS SICE International Joint Conference, 2009 年 8 月 21 日, 福

岡国際会議場.

- ③ 山根 圭貴, 石川 昌明, 被食者・捕食者系における時空間パターンへの外乱の影響解析, 第 27 回日本シミュレーション学会大会発表論文集, (査読無), 平成 2008 年 6 月 20 日, 立命館大学びわこ・草津キャンパス
- ④ M. Ishikawa, Simulation Analyses of Behaviors of Spatially Extended Predator prey Systems with Random Fluctuations, The 8th International Conference on Development and Application Systems, 平成 2008 年 5 月 22 日, Stefan cel Mare University (Romania)
- ⑤ 新谷 秀明, 石川 昌明, 走化性バクテリアコロニー形成過程への外乱の影響解析, 第 16 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2007 年 11 月 10 日, 山口大学工学部
- ⑥ M. Ishikawa, Simulation Analyses of Spatio-temporal Patterns formed by Chemotactic Bacteria under Random Fluctuations, 第 39 回ストカスティックシステムシンポジウム, 2007 年 11 月 8 日, 佐賀大学工学部
- ⑦ M. Ishikawa, Influence of Random Uncertainties on Complex Spatio temporal Patterns generated by Stochastic Predator prey Systems with Diffusion, The 38th Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems, 2007 年 6 月 11 日, ユバスキュラ大学 (フィンランド)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

ホームページ

<http://www.fs.csse.yamaguchi-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 昌明 (ISHIKAWA MASAOKI)
山口大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 30201916

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし