

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740064

研究課題名（和文） 真正粘菌変形体にみられる遷移ダイナミクスに対する数理モデルの作成とその数理解析

研究課題名（英文） Mathematical analysis of transient pattern dynamics in Physarum polycephalum

研究代表者

上田 肇一（UEDA KEIICHI）

富山大学大学院理工学研究部（理学）・准教授

研究者番号：00378960

研究成果の概要（和文）：真正粘菌変形体は単細胞生物であり、脳のような高次情報処理機構が存在しないが、環境の変化に応じて適切に行動を変化させることができる。このような環境適応的振る舞いを可能にする化学反応ネットワークの数理機構を明らかにするために、生物実験および数理モデルの作成によって現象の解明を試みた。本研究によって、（1）忌避物質を与えた際の移動方向変更の仕組み（2）原形質ゲルの収縮弛緩運動の情報処理における役割に関する数理解析を行った。

研究成果の概要（英文）：The survival of an organism can depend upon the direction in which it decides to move in response to changes in external conditions. In this project, we proposed mathematical models to elucidate mathematical mechanism of chemical reaction network for adaptive behavior. It was found that the proposed model describes a physicochemical mechanism of coupling between the local modulation of frequency and the global transport of protoplasmic mass. The decision process was clarified from a rheological point of view.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数学・数学一般(含確率論・統計数学)

キーワード：反応拡散系，真正粘菌変形体，数理モデル，環境適応性，細胞運動，遷移ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

これまで申請者は、分水嶺解近傍におけるパルスダイナミクスの研究を主軸に、局在パ

ターンの消滅や分裂等遷移ダイナミクスの発生機構の解明を目的とした数理解析手法の開発を行ってきた。そこで本研究では真正

粘菌の移動運動にみられる収縮弛緩運動と伸展運動に着目し、これら複数の自己組織化パターンの相互作用が生み出すパターンダイナミクスを取り扱う事で従来の解析手法の更なる発展を目指す。

2. 研究の目的

本研究の目的は、収縮弛緩運動と伸展運動によって発生する遷移ダイナミクスの数理的機構を解析するための解析手法を開発し、真正粘菌にみられる遷移ダイナミクスの発生機構を明らかにすることによって、環境適応的な振る舞いを可能にする数理的機構を明らかにすることである。そのために、生物実験で発見された遷移ダイナミクスを再現する数理モデルの作成と計算機支援による数理解析を行う。

3. 研究の方法

(1) Takagi らによる生物実験 (S. Takagi, T. Ueda, *Physica D*, 237(3), 420-427 (2007)) に対する数理モデルの構築を行い、収縮弛緩運動と原形質流動間の相互作用を明らかにする。そのために、大域的分岐図を作成するソフトウェアを開発する。

・Takagi らによる生物実験を再現する数理モデルの作成

真正粘菌の表面部はアクトミオン繊維などで構成されたゲル状の物質で覆われ、その内部にゾル状の原形質が流動している。それらゲル層とゾル層からなる場を想定し、モデル方程式を構築する。ゲル層で発生する収縮弛緩運動に関する化学反応を反応拡散系で記述し、ゾル層における原形質は収縮弛緩運動によって発生する圧力勾配に応じて輸送させる。収縮弛緩運動と原形質流動間の相互作用を考慮することによって Takagi らが発見した定在波、スパイラルパターン、ターゲットパターンを再現する数理モデルを作成する。

さらに、作成した数理モデルの妥当性を示すために、定在波→スパイラルパターン→ターゲットパターンの順で遷移させる分岐パラメータを発見する。

定在波からスパイラルパターンへの遷移現象は空間大域的なフィードバックを考慮した反応拡散系で観察されることが知られている。そのため、細胞内部の圧力変化など空間大域的なフィードバックに関係する効果を数理モデルに組み込むことによって現象の再現を試みる。

(2) Matsumoto らによる生物実験

(K. Matsumoto et al., *J. Theor. Biol.*, 131, 175-182 (1988)) を再現する数理モデルを提案する。さらに、数理モデルに対する数理的

解析を行うことによって、環境適応的な動きに必要な収縮弛緩の振動数の変化に応じた原形質の輸送が起きる仕組みを明らかにする。

・Matsumoto らによる生物実験を再現する数理モデルの作成

Matsumoto らによる生物実験においては真正粘菌の表面がシート状のゲルによって覆われ、その中に管が形成されている様子が観測される。さらに、ゲルの収縮弛緩によってシート及び管内において原形質の往復流動がみられるが、それぞれの部分で原形質の流速が異なることが確認されている。この数理モデルでは、シート及び管内における原形質流動の支配方程式をそれぞれ導出し、それらの層の間の原形質の輸送を考慮に入れた方程式を導出する。

(3) 局所刺激に対する応答

細胞内では様々な時間周期を持つ化学反応が起きていることが知られている。しかし、それらの多くが生物学的な機能においてどのような役割を持つかは明らかにされていない。移動運動中の細胞先端に忌避的の刺激を与えた際の振る舞いを観察し、数理モデルによってみられる振る舞いと比較検証する。

4. 研究成果

Takagi らによって得られたパターンダイナミクスを再現する数理モデルするために、原形質流動と収縮弛緩運動をカップリングさせた方程式の導出を行った。原形質流動には Darcy 則による方程式、収縮弛緩運動は Smith らにより導出された方程式を用いた。このモデルを用いることによって、細胞の境界条件によってスパイラル発生および消滅が再現できることを確認した。

(1) で導出したモデルを基盤として、Matsumoto らによって得られた実験結果を再現する現象論的モデル方程式の作成を試みた。これまで我々が提案してきたモデルを拡張し、収縮弛緩運動と原形質流動の相互作用を考慮した。数値実験の結果、収縮弛緩運動-原形質流動-ゾル・ゲル変換の3つの効果が適切に相互作用することによって共鳴現象が発生し、空間非対称な運動が生成され、生物実験で観察される、伝播波の上流に向かって細胞が移動する現象を再現することに成功した。さらに、収縮弛緩運動の方程式に対してパラメータサーチを行った結果、FitzHugh-Nagumo 方程式のような閾値を持つ非線形性において共鳴現象が発生しやすいことを発見した。

また、数理モデルの大域的分岐図を作成するために、反応拡散系に適用可能な分岐追跡

ソフトウェアの開発を行った。

(3) 細胞が忌避物質に接した際に見せる、行動選択機能に関わる化学反応の特徴を明らかにするために、実験家との共同研究によって実験および理論の両面から現象の考察を行った。生物実験では、様々な時間周期で光刺激を与え、細胞が忌避物質を通過する時間を観測することによって、行動選択に関わる特徴的な周期が存在することを示した。この実験結果を理論的に解明するために、フェーズフィールドモデルを用いた数理モデリングを行い、先端部分で起きる化学反応と細胞運動をカップリングさせた方程式を導出した。方程式に対する数値シミュレーションによって周期的外部刺激が行動選択時間を短縮させることを確認し、伸展運動に関わる化学反応が行動選択速度に影響することを示唆する結果を得た。さらに、伸展運動に関わる化学反応の非線形性に注目することによって、光刺激によって意思決定時間が短くなる仕組みを数理的に解明した。

(4) 真正粘菌変形体が示す遷移ダイナミクスの発生機構を解析的に理解するためにパルスダイナミクスの数理解析及び厳密解析を行った。

大域的分岐構造解析ソフトウェアを開発することによって、(i)パルスの自己複製パターンでみられる遷移ダイナミクスの解析、(ii)カオス的な振動を見せる脈動進行波解を数値的に発見することに成功した。

(i) Gray-Scott モデルと呼ばれる反応拡散系では、空間領域の拡大によりパルス（空間局在パターン）が次々に分裂する現象が観察される。空間一様な領域拡大に対してはパルスの数が2倍ずつ増加する、同時分裂過程が広く知られているが、我々が行った数値実験によって領域拡大速度に応じて分裂過程が変化することが明らかになった。その仕組みを解明するために、計算機を用いた大域的分岐構造解析と縮約法を用いた厳密解析を行った。

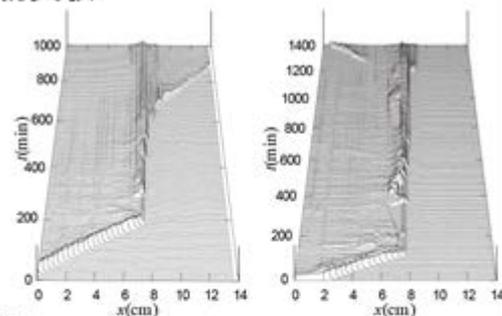
(ii) Gray-Scott モデルではパルスのサイズが周期的に変化しながら一定方向に進む、脈動進行波解が存在することが知られている。大域的分岐構造解析によって脈動進行波解の分岐構造を解析することが可能になり、周期倍分岐が起きることを発見することに成功した。さらに、周期倍分岐点近傍にて数値実験を行うことによってカオス的な振動を見せる解が存在することを発見した。

(5) パラメータの空間非一様性によって生

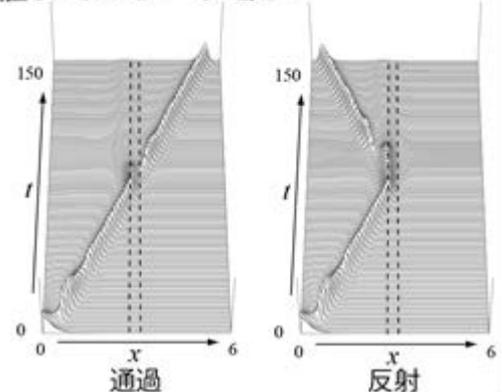
成される定常解に関する安定性解析

真正粘菌が忌避物質を通過する現象に対応する、非一様場におけるパルスダイナミクスを扱った。場の非一様性によって生じるパルスダイナミクスの定性的変化を調べるためには、定常パルス解の安定性解析を行うことが必要である。本研究では幾何学的な解析手法を適用することによって、3変数反応拡散系でみられるパルス解の存在性と安定性に関する解析を行った。

生物実験



数値シミュレーション



② A mathematical mechanism for instabilities in stripe formation on growing domains, Kei-Ichi Ueda, Yasumasa Nishiura, Physica D, 241, 37-59, 2012 査読あり

DOI: 10.1016/j.physd.2011.09.016

③ Chaotic motion of propagating pulses in the Gray-Scott model, Masaaki Yadome, Kei-Ichi Ueda, Masaharu Nagayama, Physical Review E, 83, 056207 [6 pages], 2011, 査読あり

DOI: 10.1103/PhysRevE.83.056207

④ Mathematical model for contemplative amoeboid locomotion, Kei-Ichi Ueda, Seiji Takagi, Yasumasa Nishiura and Toshiyuki Nakagaki, Physical Review E, 83, 021916 [9 pages], 2011, 査読あり

DOI: 10.1103/PhysRevE.83.021916

⑤ Pinned fronts in heterogeneous media of jump type, Peter van Heijster, Arjen Doelman, Tasso J Kaper, Yasumasa Nishiura and Kei-Ichi Ueda, Nonlinearity, 24, 127-157, 2011, 査読あり

DOI: 10.1088/0951-7715/24/1/007

⑥ 真正粘菌変形体の環境適応性, 上田 肇一, 高木 清二, 中垣 俊之, 西浦 廉政, 物性研究, 96(1), 93-94, 2011, 査読なし

⑦ 真正粘菌変形体の環境適応行動の数理モデル, 上田 肇一, 高木 清二, 中垣 俊之, 数理解析研究所講究録, 1751, 109-112, 2011年 査読なし

⑧ Numerical approach to transient dynamics of oscillatory pulses in a bistable reaction-diffusion system, Masaharu Nagayama, Kei-ichi Ueda and Masaaki Yadome, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, 27, 295-322, 2010 査読あり

DOI: 10.1007/s13160-010-0015-8

[学会発表] (計 8 件)

① 上田肇一, 自己修復機能を有するループ探索システム, 非線形現象の数値シミュレーションと解析 2013, 2013年3月9日, 北海道大学理学部

② 上田肇一, 自己修復機能を有するループ探索システム, 応用数学合同研究集会, 2012年12月21日, 龍谷大学

③ Keiichi Ueda, Yasumasa Nishiura, Yoko Yamaguchi and Keiichi Kitajo, A mathematical model of state-dependent phase resetting properties of alpha rhythm in the human brain, Dynamic Brain Forum, 2012年9月4日, hotel El Parador, Carmona, スペイン

④ 上田肇一, 高木清二, 中垣俊之, 真正粘菌変形体の環境適応行動に対する数理モデル, 日本数学会年会, 2012年3月29日, 東京理科大学

⑤ Keiichi Ueda, Mathematical Model for Contemplative Amoeboid Locomotion, 7th International Conference on Industrial and Applied Mathematics, 2011年7月18, Vancouver Convention Centre, カナダ

⑥ 上田肇一, 高木清二, 中垣俊之, 真正粘菌変形体にみられる外部刺激に対する情報処理, 2010年度 応用数学合同研究集会, 2010年12月18日, 龍谷大学

⑦ Keiichi Ueda, Seiji Takagi, Toshiyuki Nakagaki and Yasumasa Nishiura, Behavior of a true slime mold crossing an environmental barrier, Statistical Physics and Biology of Collective Motion, International Workshop -, 2010年11月8, Max-Planck-Institut fur Physik komplexer Systeme, Dresden, ドイツ

⑧ 上田肇一, 高木清二, 中垣俊之, 西浦廉政, 真正粘菌変形体にみられる環境適応性, 日本応用数理学会 2010年度年会, 2010年9月8日, 明治大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 肇一 (Keiichi Ueda)

富山大学・大学院理工学研究部 (理学)・准教授

研究者番号: 00378960