

平成22年 5月28日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20740055

研究課題名（和文） 生物の移動運動にみられる環境適応性の数理的解明

研究課題名（英文） Mathematical analysis of adaptive behavior in biological systems

研究代表者

上田 肇一 (Keiichi Ueda)

京都大学・数理解析研究所・助教

研究者番号：00378960

研究成果の概要（和文）：真正粘菌変形体及びヒトの2足歩行においてみられる環境変化に対する適応性について研究を行った。真正粘菌変形体は忌避物質に接した後に、その濃度に応じて適切な振る舞いをする事が知られている。本研究では、現象論的モデル方程式を提案し、細胞先端部における化学反応の活性化の制御が環境適応的な振る舞いにおいて重要な役割を果たすことを示した。また、ヒトの2足歩行システムに関する数理モデルを解析し、股関節、及び膝関節のダイナミクスを歩行速度の関数として記述することによって、システムが様々な環境変化に適応できることを数値シミュレーションによって確認した。

研究成果の概要（英文）：Adaptive behaviors observed in the true slime mold and bipedal locomotion systems have been studied. Recently, it has been reported that even single-celled organisms appear to be indecisive when confronted with an obstacle. In this project, the phenomenological model equation was proposed, and found that an on-off transition between refractory and activated state of chemical reactivity taking place at the leading edge plays a key role in the emergence of adaptive behavior. By investigating numerically the bipedal walking systems, it was found that the system shows an adaptive behavior by governing the dynamics of knee and hip joint by walking velocity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：数学一般

科研費の分科・細目：数理モデル

キーワード：真正粘菌変形体、2足歩行モデル、反応拡散系、遷移ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

生命現象や化学反応における現象論的な

数理モデルを構築する際には一般に極めて多くの変数が存在するため、システムの状態

変化に対してどのようなパラメータや変数の変化が本質的に効いているか数値シミュレーションを行うだけで判断することは困難である。H.Hakenらはシステムが線形安定性を失う臨界点近傍でその本質的振る舞いを低次元ダイナミクスで記述できることを示した。しかし、その手法は解が安定解近傍の状態にある場合にのみ有効であり、システムのパターンを大きく崩すような環境変化に対する適応性は議論できないという問題点がある。

申請者はこれまで化学反応や生物の形態形成にみられるパターンを再現する反応拡散系において、スポットパターンにおける遷移ダイナミクスを扱ってきた。空間的な環境非一様性を進行スポットに加えることにより分裂、消滅、カオス的なパターンなど様々な現象がみられることを示し、解の振る舞いの変化する際の解軌道を調べることで次のことがわかった。

- 1) 解軌道は分水嶺解と呼ばれる不安定定常解または不安定周期解に近づく。
- 2) 最終的にみられるパターンは実質1次元ダイナミクスを調べることで予測できる。

これらの結果から解の行き先を判断する場合、分水嶺解近傍のダイナミクスが決定的であり、2)の性質から分水嶺解近傍において状態変数と状態制御パラメータが定義できることがわかった。分水嶺解は反応拡散系に限らず、様々な方程式系において発見されており、普遍的な存在であることが予想されている。そこで、これらの性質を真正粘菌変形体及びヒトの2足歩行におけるモデル方程式に応用することによって、システムが安定解から遠い状態においても移動運動にみられる適応性にとって重要な変数やパラメータを決定できると考えた。さらに、2足歩行モデルにおいては状態制御パラメータを状態変数の関数にとることにより、様々な環境変化に対して高い適応性をみせることを可能にすると考えた。

2. 研究の目的

(真正粘菌変形体)

真正粘菌変形体に関しては真正粘菌の先端部の移動運動において見られる適応性について扱う。最近、高木清二(北海道大学)らは真正粘菌が嫌う物質であるキニーネを真正粘菌の先端部分に付けた際に、進行方向の変化や先端部が分裂することでその物質から逃げるといった適応性を示すことを報告

した。この現象においては先端部の活動がキニーネの存在によって一旦停止し、しばらくした後活動を突如再開するという奇妙な振舞いをみせる。このような現象を再現するモデル方程式は未だ提案されておらず、適応メカニズムは理解されていない。本研究では真正粘菌の先端部分の運動を再現するモデル方程式を作成し、状態制御パラメータを導出することにより、パターン選択にとって重要な変数を特定する。さらに、分岐解析を行うことによって活動の再開において必要な非線形性の特徴を明らかにする。

(ヒトの2足歩行)

ヒトの歩行においては様々な環境変化が起きても、それがある程度であれば適切に適応し転倒することはない。環境変化に対する適応性に関して数理モデルを用いて理解する試みは数多く存在するが、それらの多くは特定の環境変化を対象としており、様々な環境変化に対応する共通原理の理解までには至っていないのが現状である。本研究では転倒状態と歩行状態を分ける状態変数を特定し、環境変化の種類に依らない転倒の条件を明らかにする。さらに、状態制御パラメータを特定し、それらを状態変数によって適切に制御することにより環境変化の種類に依らない高い適応性を有したモデル方程式を構築する。

3. 研究の方法

(1) 真正粘菌変形体においては細胞全体で見られるゲルの収縮弛緩運動とゾルの流動現象に加え、移動運動をする際に先端部で特徴的な化学反応が起きていることが報告されている。そこで、それらを考慮に入れた現象論的モデル方程式を提案した。数理モデルに対する数値実験を行い、環境適応性を再現する数理的仕組みを考察した。

(2) 真正粘菌変形体の移動運動においては反応拡散系のパルスダイナミクスを詳細に解析する必要がある。そこで、パルス同士の対衝突現象によって観察される入出力関係の定性的変化によって本質的な仕組みを明らかにした。

(3) 2足歩行システムのモデル方程式に対する数値実験を行い、セパトトリクスを発見する。セパトトリクスの周りで詳細な数値実験を行い、システム全体の状態を数値化する変数の発見と、適切な姿勢制御関数を記述することによって、環境適応性を再現する。

4. 研究成果

(1) 真正粘菌変形体の環境適応性

真正粘菌変形体の先端部分に忌避物質を付加することによって、その濃度に応じて定性的に3つのパターン（通過、分裂、反射）が観察されることが実験的に知られている。ゲルの収縮弛緩運動、原形質流動、及び細胞先端部で起きる化学反応を相互作用させた数理モデルを構築し、3つのパターンを再現することに成功した（図1）。さらに、移動運動は先端部でみられる局在パターンの活性化状態をコントロールすることによって移動運動を制御していること、さらにその活性化は原形質の量によって制御されることを示した。このことから、環境適応的な振る舞いにとって原形質流動は重要な役割を果たすことを示すことに成功した。

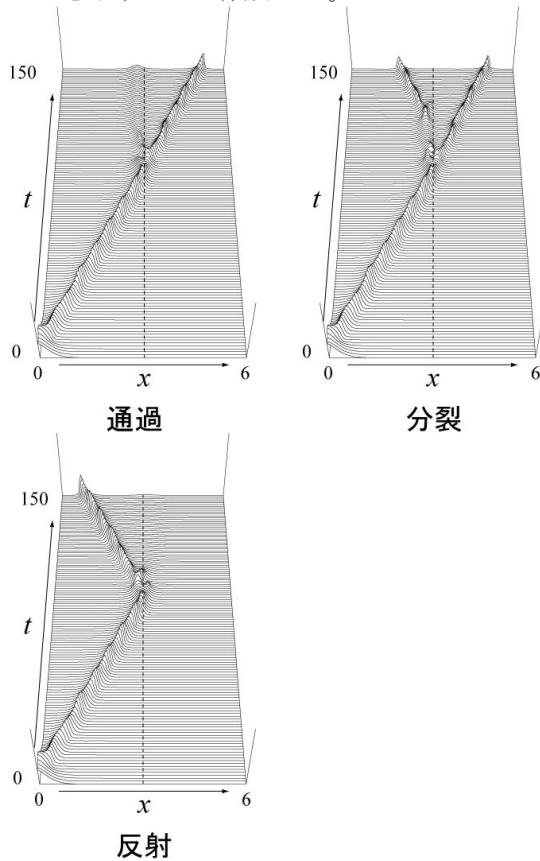


図1：数値シミュレーション結果。忌避物質に接した後の振る舞いが、その濃度によって変化する様子を再現した。

(2) 反応拡散系にみられる散乱パターン

反応拡散系にみられる局在パターンの対衝突によってみられる入出力関係について考察した。対衝突後のパターンが変化するには解軌道が分水嶺解と呼ばれる不安定解に近づくことを示した。また、分水嶺解が不安定周期解の場合には、出力パターンがパラメ

ータの変化に対して周期的に変化することを発見した（図2）。このことから、局在パターンに対して摂動を加えた際の振る舞いは、分水嶺解からの不安定多様体の行き先によって特長付けられることがわかった。

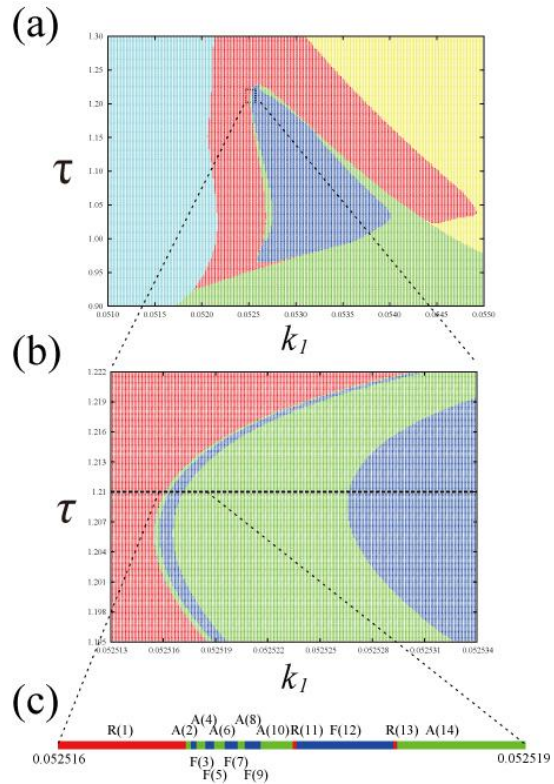


図2：(a)ある反応拡散系のパルスの散乱パターンに対する相図。赤：反射。緑：対消滅。青：融合。(b) (a)の拡大図。対消滅と融合がパラメータの変化に対して周期的に変化する様子がみられる[(c)]。

(3) 2足歩行システムにおける環境適応性
常微分方程式で記述される2足歩行システムの解構造を詳細に調べることによって、セパトリクス（不安定周期解）を発見した。セパトリクスから延びる不安定多様体の性質を調べることによって、システム状態の状態を評価することができる「状態変数」を発見した。さらに、状態変数によって膝関節と股関節のダイナミクスを拘束することによって、システムが予期せぬ外乱が加わった際にも、安定な歩行を維持することを示した（図3）。

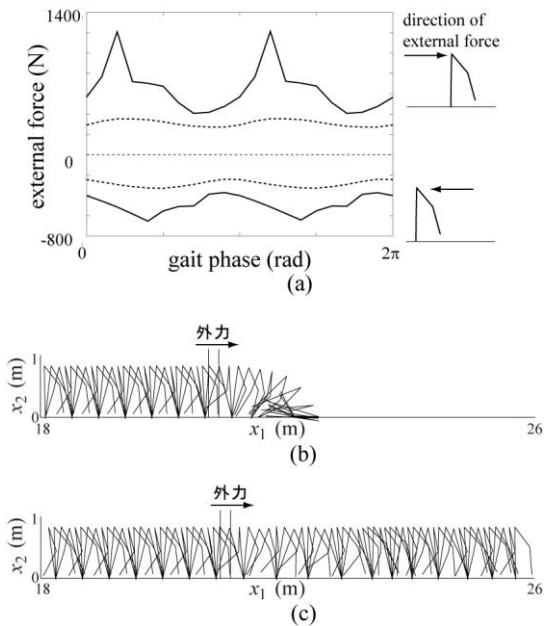


図3：(a)状態変数による制御があるシステム（実線）とないシステム（破線）。横軸：システムに摂動が加わるタイミング。縦軸：摂動の大きさ。(b)(c)摂動が加わった後の解の振る舞い。(b)状態変数による制御がないシステム。(c)状態変数による制御があるシステム。

(4) 不安定な地面を歩く2足歩行システム
2足歩行システムが不安定な杭の上を歩き続ける条件について考察した。身体と杭の間に適切な拘束条件を与えることによって、歩行を維持することを発見した。さらに、(3)で発見した状態変数によって膝関節のダイナミクスを拘束することによって、外乱が加わる状況下においても杭の上を歩き続けることを確認した。

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7件)

- ① Kunishige Ohgane and Kei-Ichi Ueda, Stabilizing bipedal walking on posts through multiple constraints, Phys. Rev. E, 査読有, 81, (2010), 041909-1-041909-6
- ② Shin-Ichiro Ei, Yasumasa Nishiura and Kei-Ichi Ueda, Pulse dynamics for reaction-diffusion systems in the neighborhood of codimension two singularity, Journal of Math-for-industry, 査読有, 1, (2009), 91-95

- ③ 大金 邦成, 上田 肇一, Adaptation of walking pattern generated by reinitializing strategy, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1633, 117-118 (2009)
- ④ 矢留 雅亮, 長山 雅晴, 上田 肇一, 反応拡散系に対する大域的分岐構造の数値計算法とその応用, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1633, 39-61 (2009)
- ⑤ 上田 肇一, 大金 邦成, 2足歩行における環境変化に対する姿勢制御, 2足歩行における環境変化に対する姿勢制御, 査読無, 1616, (2008), 128-136
- ⑥ Masaaki Yadome, Kei-Ichi Ueda, Takashi Teramoto, Masaharu Nagayama and Yasumasa Nishiura, BULLETIN of the Institute of Mathematics Academia Sinica New Series, 査読有, 3(4), (2008), 585-602
- ⑦ Kunishige Ohgane and Kei-Ichi Ueda, Instability-induced hierarchy in bipedal locomotion, Phys. Rev. E, 査読有, 77(5), 2008, 051915-1-051915-13

[学会発表] (計3件)

- ① 上田 肇一, 大域的分岐図を利用したパルスダイナミクスの解析、日本数学会年会、2010年3月27日、慶應義塾大学
- ② 上田 肇一, 2足歩行における環境変化に対する姿勢制御、日本応用数理学会2009年度年会、2009年9月30日、大阪大学
- ③ 上田 肇一, 真正粘菌変形体の運動と環境適応、日本数学会、2009年3月28日、東京大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 肇一 (Keiichi Ueda)

京都大学・数理解析研究所・助教

研究者番号：00378960