

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間： 2006~2009

課題番号：18300079

研究課題名 (和文)

力学系における時空間パターンによるアトラクター間遷移とその機能

研究課題名 (英文)

A transition among attractors in dynamical systems and its functional roles

研究代表者

青柳 富誌生 (AOYAGI TOSHIO)

京都大学・情報学研究科・講師

研究者番号：90252486

研究分野：非線形動力学，理論神経科学

科研費の分科・細目：感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：脳，ネットワーク，リズム，アトラクター，力学系

1. 研究計画の概要

高度な機能や情報処理を行うシステムは、しばしば複雑な相互作用をした非線形力学系である。例えば、生物の免疫ネットワーク・遺伝子や酵素反応ネットワーク・神経ネットワークなどは、いろいろな基本的要素が非線形相互作用することにより高度な機能を発現している良い例である。このような系を詳しく研究し、機能発現のメカニズムを知ることが将来、新たな情報処理原理や生体と同じような柔軟な計算システムを開発する基礎となると考えられる。そこで本研究では、非線形力学系が機能を発現する場合に共通に重要な特性と考えられる以下の2点に関して研究を行う。

(1)アトラクター間遷移と時空間パターン

(2)ネットワーク構造と機能の関係性

2. 研究の進捗状況

本研究では、大規模数値計算および理論解析の両面から研究を進めてきた。理論解析には、発火タイミングを自然に表現でき、本質を捉えた解析的に取り扱いやすい簡単な数理モデルが望ましいが、一方では神経系はシナプスの電氣的相互作用以外に多様な神経伝達物質などを介しても神経活動を修飾している一種の化学装置であるとも言える。そのような点を考慮して数理モデルを構成する際に問題となるのは、現実の系はカルシウムイオン等が複雑に相互作用している非線形力学系と見なせ、しばしばダイナミクスの本質を捉えるのが困難であり、結果としてネ

ットワークレベルの本質的な現象の理解の障壁になっている点である。しかしながら、近年の非平衡物理学や非線形力学の発展により、複雑な力学系から本質を捉えた簡単な力学系へ自由度を削減する幾つかの理論が提唱されている。そこで、複雑な非線形ネットワークのダイナミクスを弱非線形解析の理論を用いてより簡単で解析可能な力学系に簡略化することで、同期などの時空間構造が重要である系のネットワークの性質を理論的に解析した。具体的には、タイミングを表現する状態変数である位相 ϕ によりニューロンのダイナミクスを記述する phase dynamics と呼ばれる手法と、力学系の観点から解析を行った。また、この理論枠組みは、周期性のある系には一般的に適応可能であり、結果はきわめて一般性があることも魅力である。ただし、複雑な系は周期性のないカオス等の性質を示す場合もあり、そのような場合にも手法を拡張する試みは必要である。この点も含めて本手法を発展させ研究を進めていく為の準備も行った。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

以上で説明したように、理論的にはいくつか進展があり、成果は論文の形で発表している。また、最終年度の目標に向けて、実験との協力研究も開始している。

4. 今後の研究の推進方策

非線形力学系の示す代表的な特徴として、カオス的な振る舞いが挙げられるが、その中でも機能や生物に関連がありそうな興味深い現象としてカオスの遍歴現象がある。ある

種のアトラクター（数学的にはミルナーアトラクターと呼ばれる。）では、アトラクターから離れる軌道も存在して、それが遍歴を生み出していると考えられている。本研究では、神経系ネットワークで示された上記視点をヒントに、アトラクターが遷移する際の時空間的構造に着目して、新たな側面からカオスの遍歴も含めた非線形現象を解析し、情報処理としての機能との関連性を探りたい。

神経ネットワークにおける予備的研究では、神経ネットワークが相関のある発火パターンを生成し、それがまたネットワークの入力として機能をコントロールするという観点が有効であった。従来、同期発火などは観測者が色々な解釈をしてその機能を推定していたが、本研究の考え方は同期発火を神経ネットワークの力学系自身に解釈してもらうという点にある。これを更に推し進め、一般的な力学系において時空間パターンと非線形力学系の関係を捉え直し、自律的協調作用により多様な機能が実現しているという観点で研究を進めていきたい。特に、今までは同期などの非常に分かりやすい時空間パターンと機能の關係に研究が集中していたが、より一般的なコヒーレントな時空間パターンの力学系に与える影響や、果たし得る機能を理論的に検証したい。また、ネットワークの構造自体が変化する一種の学習適用ルールに関しても、神経系からのヒントを基礎に枠を広げて研究を進めていきたいと考えている。

5. 代表的な研究成果

[雑誌論文] (計 10 件)

1. Dynamics in Co-evolving Networks of Active Elements, Takuma Tanaka, Takaaki Aoki, and Toshio Aoyagi, **FORMA**, (in press) 査読有.
2. Estimation of functional connectivity that causes burst-like population activities, Masaki Nomura, Daisuke Ito, Hiroki Tamate, Kazutoshi Gohara and Toshio Aoyagi, **FORMA** (in press) 査読有.
3. Recurrent infomax generates cell assemblies, neuronal avalanches, and simple cell-like selectivity, Takuma Tanaka, Takeshi Kaneko, and Toshio Aoyagi, **Neural Computation** vol. 21, no. 4, 1038-1067 (2009) 査読有.
4. Co-evolution of phases and connection strengths in a network of phase oscillators, Takaaki Aoki & Toshio Aoyagi, **Physical Review Letters**, vol.102, Issue 3, 034101(2009) 査読有.
5. Ordering Process of Self-Organizing Maps Improved by Asymmetric Neighborhood Function, Takaaki Aoki, Kaiichiro Ota, Koji Kurata & Toshio Aoyagi, **Cognitive Neurodynamics**, Vol. 3, 9-15, (2009) 査読有.
6. Optimal weighted networks of phase oscillators for synchronization, Takuma Tanaka & Toshio Aoyagi, **Physical Review E**, vol.78, Issue .4, 046210 (2008), 査読有
7. Weighted scale-free networks with variable power-law exponents, Takuma Tanaka, Toshio Aoyagi, **Physica D**, vol. 237, no. 7, pp. 898-907 (2008) 査読有.
8. Synchrony-induced switching behavior of spike-pattern attractors created by spike-timing dependent plasticity, Takaaki Aoki & Toshio Aoyagi, **Neural Computation**, Vol. 19, No. 10: 2720-2738 (2007) 査読有.
9. Synchronous and asynchronous bursting states: role of intrinsic neural dynamics, Takashi Takekawa, Toshio Aoyagi, Tomoki Fukai, **Journal of Computational Neuroscience** vol. 23, no 2:189-200 (2007) 査読有.
10. Self-Organizing maps with Asymmetric Neighborhood function, Takaaki Aoki & Toshio Aoyagi, **Neural Computation**, vol.19, no.8, 2525-2535 (2007) 査読有.

[学会発表] (計 2 件)

1. 周期の揺らぎで重みを付けたスパイクトリガー平均からの位相応答関数の抽出, 青柳 富誌生, リズム現象の研究会 IV, お茶の水大学, 2009年1月26日 (招待講演)
2. 動的素子のネットワークの数理, 青柳 富誌生, 第66回 形の科学シンポジウム, 京都大学, 2008年10月31日 (招待講演)

[図書] (計 3 件)

1. リズム活動と位相応答, 青柳富誌生, 神経ダイナミクスと情報表現 (東大出版)、4章、(出版予定)
2. 神経細胞の数理モデル, 青柳富誌生, 数理科学事典 (丸善)、5章1節、(出版予定)
3. 細胞集団の同期, 青柳富誌生, 数理科学事典 (丸善)、5章2節、(出版予定)