

平成 21 年 4 月 30 日現在

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

研究成果の概要 (和文)：

高度な機能や情報処理を行うシステム、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、複雑な相互作用をした結合非線形力学系である。本研究では周期発火状態にある動的素子のネットワークに関して、一般的性質を研究した。結合の変化のダイナミクスのタイプに応じて3つの典型的な状態が構造安定なものとして出現することがわかった。具体的な結果の一例として、Hebb 的な学習ルールは2値記憶と同等の連想記憶能力があり、STDP 的な学習ルールは色々なタイミングや時間的シーケンスが記憶可能であることが判明した。

研究成果の概要 (英文)：

Many real-world complex systems investigated in engineering, biology, and the social sciences can be regarded as dynamical networks of active elements in which the coupling connections and the states of the elements evolve simultaneously. We have first studied an evolving recurrent network in which phase oscillators and synaptic weights interact with each other. We found that the system exhibits three states: two-cluster, coherent with a fixed phase relation, chaotic states with frustration. We believe that, because of its structural stability, our model will provide a framework for describing essential behavior in co-evolving systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18年度	4,200,000	0	4,200,000
19年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
20年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
21年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
総計	14,700,000	3,150,000	17,850,000

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. 研究開始当初の背景

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。また、そのような系のネットワーク構造には、スケールフリー性やスモールワールド性などの普遍的な性質が見られることもわかってきた。非線形力学系が機能を発現する場合、素子間の結合構造（ネットワーク）と素子の状態が同時に変化し発展する動的素子のネットワークと見なせることが多い。その共通の性質に関する基礎理論の研究を行えば、これらの系に対する理解が深まることが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、ネットワークの構造がダイナミクスにより変化する場合の力学的振る舞いと機能の関係性に着目し、研究を進める。神経ネットワークの事例では、STDPのような発火タイミングに依存して結合が変化し、結果として機能を発揮した例があった。その際に重要であったのは、学習が完了したネットワークにおいて、外部から加える刺激の同期特性の重要性である。その同期の度合いにより、個別のパターンを初期条件に応じて連想記憶するのか（非同期的入力）、それぞれのパターンの因果関係を想起するのか（同期入力）という機能の切り替えが生じた。その事実をヒントに、一般的な非線形要素のネットワークを考え、異なる時空間パターンに応じた機能のコントロールの可能性を探るのが本研究の究極の目標である。興味深い事実として、神経系でみられた前後のニューロンのスパイクタイミングに依存した結合の学習ルールであるSTDPに関しても多様なものも見つかっている。そこで、学習ルールを変えた場合の形成されるネットワークやダイナミクスの性質を調べ、力学系としての性質と機能との関係を探る。

3. 研究の方法

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、力学系的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用可能であり、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に理論的研究も進んだ。これは次の研究につながる手法としての新たな成果といえる。

4. 研究成果

周期発火状態にある動的素子のネットワークに関して、一般的性質を研究した。周期発火しているニューロンの力学系は、位相振動子モデルで本質的に記述できることが知られている。問題は、結合の変化規則であるが、前後の2ニューロンの位相差にのみ依存するルールを考える。これは、絶対的な時間ではなく、相対的な時間差が物理的に意味があることの反映である。学習ルールや結合の形に依存して、最終状態はどのような動的振る舞いが生じるか、系統的に調べておけば、個別的に調べられた今までの知見を見直し、今後の研究にも重要な指針を与えることができる。興味深いことに、学習関数の形に応じて3つの典型的な状態が構造安定なもの

として出現することがわかった。学習ルールが Hebb 的, すなわち近い位相のニューロンの結合は正の方向へ強化し, 異なる位相のニューロンの結合は負の方向へ強めるルールにすると, 最終的に 2 クラスター状態に分かれる。2 グループのニューロンの比は初期条件などに応じて色々な値を取り得る。学習ルールが非対称 STDP 的, すなわち位相差の符号に学習ルールが依存する場合, 最終的にニューロン間の発火順序を保持するコヒーレントな定常状態に落ち着く。学習ルールは反 Hebb 的なルールの場合, いつまでたっても定常状態に収束せず, カオス状態となる。上の 3 つの状態において, 相互情報量を用いた解析をおこなうと, コヒーレントな状態が一番情報量が多く, 次に 2 クラスター状態であり, ほぼゼロに近いカオス状態となる。ここから, Hebb 的な学習ルールは 2 値記憶と同等の連想記憶能力があり, STDP 的な学習ルールは色々なタイミングや時間的シーケンスが記憶可能であることが判明した。カオス状態の機能的意味は今後の検討課題である。

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 31 件)

1. Weighted spike-triggered average of a fluctuating stimulus yielding the phase response curve, Kaiichiro Ota, Masaki Nomura, and Toshio Aoyagi, **Physical Review Letters**, vol.103, Issue 2, 024101(2009) 査読有.
2. Dynamics in Co-evolving Networks of Active Elements, Takuma Tanaka, Takaaki Aoki, and Toshio Aoyagi, **FORMA**, Vol. 24 (No. 1), 17-22, (2009) 査読有.
3. Estimation of functional connectivity that causes burst-like population activities, Masaki Nomura, Daisuke Ito, Hiroki Tamate, Kazutoshi Gohara and Toshio Aoyagi, **FORMA** Vol. 24 (No. 1), 11-16, (2009) 査読有.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. A Novel Method of estimating the phase response function -Weighted spike-triggered average of fluctuating stimulus-, Toshio Aoyagi and Kaiichiro Ota, Proceedings of 3rd International Symposium on Mobiligence in Awaji, 379-382 (2009) 査読有.
8. Dendritic shape and EPSP conduction of cortical nonpyramidal cells, Yoshiyuki Kubota, Fuyuki Karube, Masaki Nomura, Toshio Aoyagi, Yasuo Kawaguchi, **Neuroscience Research**, Volume 65, Supplement 1, S84 (2009) 査読無.
9. Estimated connections that capture population burst-like activities, Masaki Nomura, Daisuke Ito, Hiroki Tamate, Kazutoshi Gohara, Toshio Aoyagi, **Neuroscience Research**, Volume 65, Supplement 1, S232 (2009) 査読無.
10. Higher-order structures in natural scenes, Takuma Tanaka, Toshio Aoyagi, and Takeshi Kaneko, **Neuroscience Research**, Volume 65, Supplement 1, S109 (2009) 査読無.
11. Experimental measurement of phase response curve employing fluctuation in rhythmic system, Kaiichiro Ota, Masaki Nomura, and Toshio Aoyagi, **Neuroscience Research**, Volume 65, Supplement 1, S232 (2009) 査読無.
12. Typical behaviors in co-evolving recurrent network of oscillatory neurons, Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, **Frontiers in Systems Neuroscience**. Conference Abstract: Computational and systems neuroscience. doi: 10.3389/conf.neuro.06.2009.03.005, (2009) 査読有.
13. Optimal weighted networks of phase oscillators for synchronization, Takuma Tanaka & Toshio Aoyagi, **Physical Review E**, vol. 78, Issue .4, 046210 (2008), 査読有
14. 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.

15. Immunocytochemistry in low-density culture of neurons on multielectrode arrays is effective for identification of action-potential pathway, Daisuke Ito, Hiroki Tamate, Masaki Nomura, Toshio Aoyagi and Kazutoshi Gohara, Society for Neuroscience 38th annual meeting, 797.16(CD-ROM) (2008) 査読有.
16. Estimation of neuronal functional connectivity of cultured neuronal networks, Masaki Nomura, Dausuke Ito, Hiroki Tamate, Kazutoshi Gohara and Toshio Aoyagi, Neuroscience Research, 61S, S236 (2008) 査読無.
17. Estimation of neuronal functional connectivity of rats' hippocampus CA1 performing a conditional discrimination task, Masaki Nomura, Yoshio Sakurai and Toshio Aoyagi, Neuroscience Research, 61S, S251 (2008) 査読無.
18. A novel method of measurement for phase response curves under noisy current injection, Kaiichiro Ota, Masaki Nomura and Toshio Aoyagi, Neuroscience Research, 61S, S73 (2008) 査読無.
19. Recurrent Infomax generates cell assembly, firing sequence, neuronal avalanche, and simple cell-like selectivity, Takuma Tanaka, Takeshi Kaneko, and Toshio Aoyagi, Neuroscience Research, 61S, S195 (2008) 査読無.
20. Ordering Process of Self-Organizing Maps Improved by Asymmetric Neighborhood Function, , Takaaki Aoki, Kaiichiro Ota, Koji Kurata, and Toshio Aoyagi, ICONIP2007, LNCS, vol. 4984 pp. 426-435, 2008 査読有.
21. 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.
22. 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.
23. Self-Organizing maps with Asymmetric Neighborhood function, Takaaki Aoki & Toshio Aoyagi, **Neural Computation**, vol.19, no.8, 2525-2535 (2007) 査読有.
24. Synchrony-Induced switching behavior of attractors in neural network organized by spike-timing dependent plasticity, Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, Proceedings of 2nd International Symposium on Mobiligence in Awaji, pp.283-286, Awaji, Japan, (2007) 査読有.
25. Dendritic dimensions of cortical nonpyramidal cells, Yoshiyuki Kubota, Fuyuki Karube, Akio Sekigawa, Masaki Nomura, Toshio Aoyagi, Atsushi Mochizuki, Yasuo Kawaguchi, Society for Neuroscience 37th annual meeting, 470.20(CD-ROM) (2007) 査読無.
26. A cooperative dynamics of network of neural oscillators between the neuronal activity and the synaptic weight, Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, Neuroscience Research, Volume 58, Supplement 1, S112 (2007) 査読無.
27. Presynaptic AMPA receptors on the corticostriatal terminals enhance the release probability of the synaptic vesicles, Takuma Tanaka, Fumino Fujiyama, Masaki Nomura, Toshio Aoyagi and Takeshi Kaneko, Neuroscience Research, Volume 58, Supplement 1, S211 (2007) 査読無.
28. Yoshiyuki Kubota, Fuyuki Karube, Masaki Nomura, Toshio Aoyagi, Atsushi Mochizuki and Yasuo Kawaguchi, Dendritic dimensions of cortical nonpyramidal cells, Neuroscience Research, Volume 58, Supplement 1, S73 (2007) 査読無.
29. Masaki Nomura, Yoshio Sakurai and Toshio Aoyagi, Behavioral inference based on hippocampal multi-neuronal activities of rats, Neuroscience Research, Volume 58, Supplement 1,, S160 (2007) 査読無.
30. Optimal weighted networks of phase oscillators maximizing frequency and phase orders, Toshio Aoyagi, Yoshihiro Yoshii, Yukito Iba and Tsuyoshi Chawanya, STATPHYS 23, the 23rd International Conference on Statistical Physics of the International Union for Pure and Applied Physics (IUPAP), pp225, (2007) 査読無.
31. Kernel Analysis Of Multi-neuronal Spike Trains, Masaki Nomura, Yoshio Sakurai and Toshio Aoyagi, 2007 IEEE/ICME International Conference on

Complex Medical Engineering-CME2007,
68-71 CD-ROM (2007) 査読有.

〔学会発表〕(計 10 件)

1. Toshio Aoyagi, A Novel Method of estimating the phase response function -Weighted spike-triggered average of fluctuating stimulus-, The 3rd International Symposium on Mobiligence in Awaji, Awaji Yumebutai International Conference Center, 2009/11/21.
2. 青柳 富誌生, 位相応答と周期の揺らぎの理論的關係とカオス系への応用への試み, 研究会『非線形の科学』第 3 回, 鹿児島大学理学部, 2009 年 6 月 23, 招待講演
3. 青柳 富誌生, 結合振動子ネットワークの最近の研究, 京都算学会 第 5 回研究会, 京都会館, 2009 年 6 月 13 日
4. 青柳富誌生, 周期的活動をしている素子のネットワークの数理モデル - 神経系を中心として -, 第 48 回日本生体医工学会大会 オーガナイズドセッション「振動子集団のちから」, 東京都タワーホール船堀, 2009 年 4 月 23 日 (招待講演)
5. 青柳 富誌生, 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, 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)
6. 青柳 富誌生, 動的素子のネットワークの数理, 第 6 6 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)
7. 青柳富誌生, 情報量最大化から見た神経ネットワークの回路構造と発火パターン, 生理学研究所 研究会「理論と実験の融合による神経回路機能の統合的理解」, 自然科学研究機構 岡崎カンファレンスセンター, 2007 年 11 月 29 日, 口頭発表 (招待)
8. Toshio Aoyagi, Yoshihiro Yoshii, Yukito Iba and Tsuyoshi Chawanya, Optimal weighted networks of phase oscillators maximizing frequency and phase orders, STATPHYS 23, the 23rd International Conference on Statistical Physics of the International Union for Pure and Applied Physics (IUPAP), Genova, Italy, 2007/7/10.
9. 青柳富誌生, 神経ネットワーク情報表現解明の試み, 研究会第 2 回「非線形の次代」, 福井, 福井大学文教キャンパス アカデミーホール, 2007 年 3 月 4

- 日
10. 青柳富誌生, 非線形科学と統計科学の可能性, 非線形科学と統計科学の周辺 ミニワークショップ, 京都, 2007 年 2 月 20 日

〔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)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 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