

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04183

研究課題名(和文) 安定カオスに基づく神経計算原理の構築と視覚的注意に関する時間特性の解明

研究課題名(英文) Neural computation principle based on "stable chaos"; Toward understanding the dynamical aspects of visual attention

研究代表者

末谷 大道 (SUETANI, HIROMICHI)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：40507167

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,100,000円

研究成果の概要(和文)：カオスニューロン写像をランダムに結合させた系について、有限サイズリアプノフ指数などの非線形動力学理論に基づく解析を行なった。その結果、写像の急峻さに関わるパラメタや結合係数を操作することによって、空間的に凍結した周期アトラクタ 弱い(超過渡)カオス 安定カオス (超過渡)カオスという遷移を示すことがわかった。また、系が安定カオスを示すとき、外部入力に対する再現性がカオスの場合よりも高まることも発見した。また、より単純な tanh 型のニューロンを素子とする持つランダム回路におけるカオスの発生機構について探究し、準周期ルートによるカオスの発生や統計的なスケーリング則をもつことを新たに発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

基礎研究としての本課題の意義は、力学系としての神経系の理解を深めることである。力学系としての神経系の顕著な特徴は、スパイク活動に代表される不連続的な非線形性である。安定カオスは、このような神経ダイナミクスを理解するための重要な概念となり得る。また、安定カオスの特性を利用することで、非線形の判別能力と長期間情報を保持できる高性能なメモリーデバイスを開発することが可能となる。本研究の進展によって、神経科学の進歩や新たな技術の開拓に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：We conducted a system of randomly coupled chaotic neuron maps using methods based on nonlinear dynamics, such as finite-size Lyapunov exponents. Our findings reveal that the system undergoes a series of transitions, starting from spatially frozen periodic attractors and progressing to weak (super transient) chaos, stable chaos, and fully-developed (super transient) chaos as we change parameters related to the steepness of the mapping and coupling coefficients. Furthermore, we observed that in the presence of stable chaos, the system demonstrates improved reproducibility to external inputs compared to the chaotic case. In addition, we investigated the mechanism behind the onset of chaos in a random system consisting of simple tanh-type neurons. Our results indicate that the system exhibits quasiperiodic root to chaos and follows clear statistical scaling laws.

研究分野：複雑系科学

キーワード：ランダム神経回路網 安定カオス 超過渡カオス 神経ダイナミクス 分岐理論

1. 研究開始当初の背景

脳は、外部からの情報を持続的に受け続けると共に、結合を通じて神経細胞間で相互に刺激し合うことによって、自らの活性状態を保ち続ける。ヘップは、巨視的な心理現象と微視的な神経生理機構を結びつけるために、ヘップ学習則やセルアセンブリ、位相連鎖など重要な諸仮説を提示した。特に、感覚刺激の繰り返しの反復に対して連合野の活動に再現性の高い活動（一貫性）が生じる際、単発の感覚事象に誘発される活動による機構化とは異なり、大きな集団の中で細胞が律動的に発火する自発活動による構造化が起きると考え、これを「内在的機構化」(intrinsic organization)と名付けた。

我々は、このヘップが提唱した内在的機構化に対して、ヒト脳において実際に自発性活動の多様性と外部からの刺激に対する一貫性が両立し得るのかという「問い」を出発点にこれまで研究を続けてきた。どの様な性質の視覚刺激列を見ると一貫性の高い活動が生じるかという問題に対して、脳波計測を通じて検証する実験パラダイムを構築した。その結果、周期的なものよりも不規則に変動する刺激列に対して明瞭な一貫性を示すこと、また、200名規模の被験者に拡大して実験を実施したところ、一貫性によって個人内の試行間の差異が減少しつつ個人間の脳活動の違いが明瞭になること、さらに各個人の一貫性の強さは数ヶ月後の再実験でも殆ど変わらないことなどを明らかにした。

しかし、これまでの研究では、チェッカーボードという情動の喚起や認知を特に必要としない中立的な画像を視覚刺激として用いていて、被験者には記憶の再認などの認知的課題を要求していなかった。内在的機構化が脳情報処理においてどのような役割を果たしているのかという問いが生まれた。

2. 研究の目的

そこで、我々はこの内在的機構化における脳活動の多様かつ柔軟な性質、すなわちランダムライクな自発性活動を示しつつ、同時に外部入力に対して一貫性を持った応答を示す特性を「安定カオス」という非線形動力学の言葉で概念化し、視覚的情報処理の問題を通じて安定カオスの計算原理としての基盤を構築することを目指した。

3. 研究の方法

安定カオスとは、線形安定性を持ちながらも（よって、カオスの初期値鋭敏性とは異なり2つの接近した軌道はやがて1つに収束する）軌道自体は不規則性に振る舞うという両義的な性質を持つ。安定カオスは、不連続性的変化など強い非線形性を持つ素子からなる結合系で発生するとされているが、明確な条件は明らかでない。

そこで、まず、予備的な研究として（1）安定カオスを発見した Politi らが考案した不連続的な変化をコントロールできるパラメタを有する結合写像格子を用いて、（無限小の摂動に対する線形安定性の指標である）Lyapunov 指数を有限摂動の場合に拡張した有限サイズ Lyapunov 指数の特性や大偏差的な性質について調べた。

次に、（2）理論モデルとして、カオスニューロン写像を素子とするランダム結合系を考え、素子の非線形性（ニューロンの活性化の急峻さ）や素子間の結合の強さをコントロールするパラメタを連続的に変えながら安定カオスが発生する条件を調べた。さらに、（3）情報処理能力を見るためにこのようなニューラルネットをリザバーとした場合の時系列の判別問題を行なった。

そして、（4）実際のヒト脳における視覚情報処理として大きさや配置をランダムにした複数個の図形を提示した視覚刺激やアラビア数字画像を提示した際の応答に関する脳波計測実験を分担者が中心となって実施した。

また、（5）より単純な tanh 型のニューロンを素子とするランダム神経回路網におけるカオスの発生機構について探究し、準周期ルートによるカオスの発生や統計的なスケールリング則を持つことを新たに発見した。

4. 研究成果

（1）安定カオスの大偏差原理的性質

Politi らは図 1 のような急峻な変化を持つ写像力学系を素子とする結合写像格子を考案した。図 2 は、不連続性をコントロールするパラメタに対する最大 Lyapunov 指数の依存性と、対応する時空間パターンを明示したものである。=0 の場合の結果でわかる様に、時空間パターン自身は乱れているものの、最大 Lyapunov 指数は負

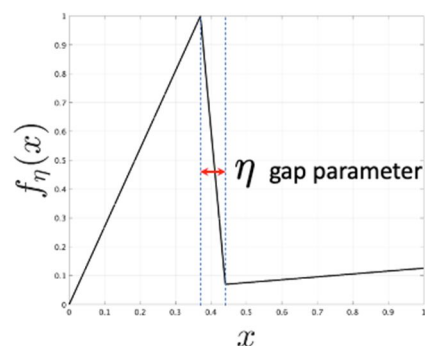


図 1

であるという pathological な振る舞いが現れる。このような振る舞いを安定カオス (stable chaos) という (ちなみに長時間後には周期アトラクタに落ち込む。すなわちこれらの状態は超過渡現象 (super-transient) である)。

本研究では、過渡時間の統計性や有限サイズ Lyapunov 指数などの性質に調べた。ここでは、大偏差的な揺らぎの結果を図3に示す。が僅かに正になって要素写像における変化が連続的になると急激に Lyapunov 指数の揺らぎが大きくなるのがわかる。

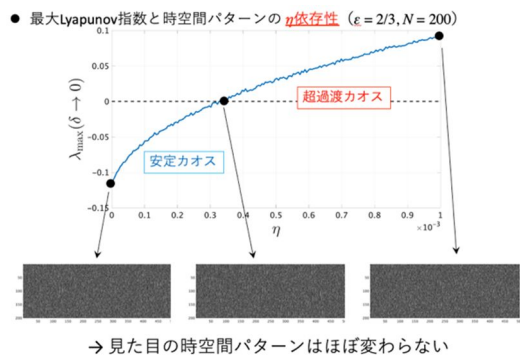


図 2

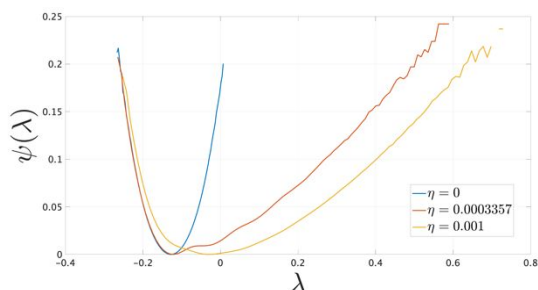


図 3

(2) ランダム結合神経回路における安定カオスとその統計的性質

次に、図4で示されたカオスニューロン写像をランダム結合したネットワークにおいて、適当なパラメタ条件で安定カオスが発生することを発見した。図5(a)は、ある結合強度において、僅かに異なる二つの初期条件から出発した軌道の時系列を重ね描きしたもので、振る舞い自体は(弱い)カオスであるが、二つの軌道は乖離しない。一方、図5(b)は、別の結合強度の場合の時系列で、初期値鋭敏性によって二つの軌道が乖離することがわかる。さらに、有限サイズ Lyapunov 指数[3]によって初期摂動に依存する軌道不安定性を定量化すると、結合強度(δ の値)に応じて周期運動, 安定カオス, 超過渡カオスの遷移を見ることができる(図5(c))。また、カオスニューロン写像の急峻な変化をコントロールするパラメタと結合強度に関して相図を描き安定カオスが発生するパラメタ領域を同定した。

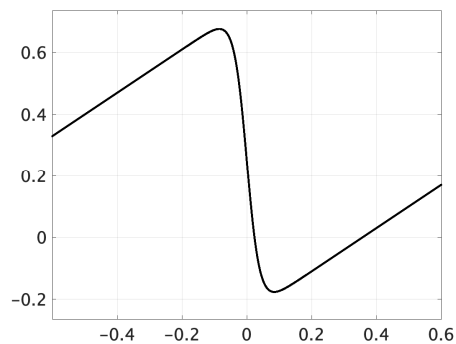


図 4

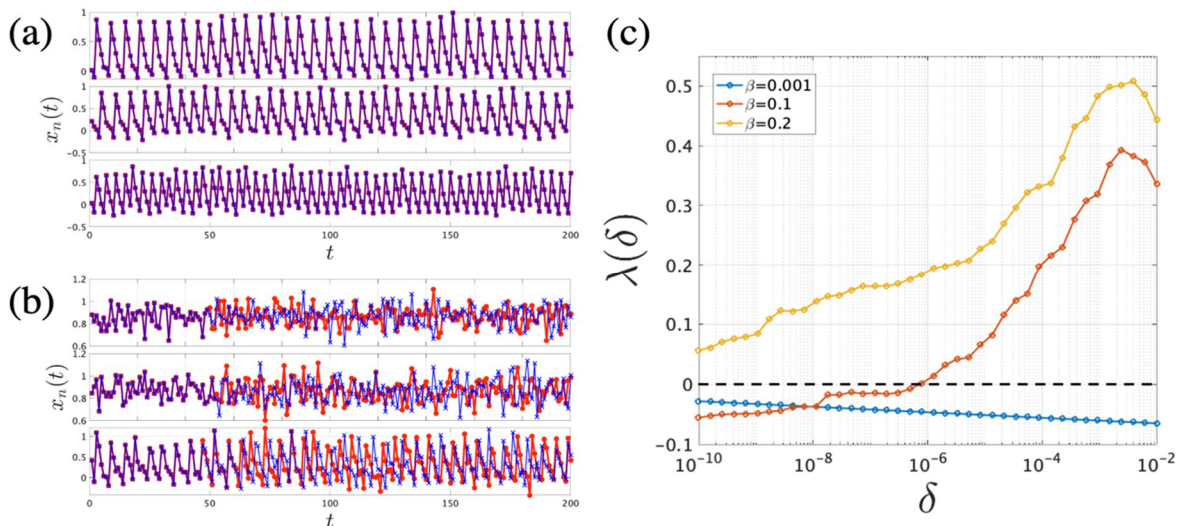


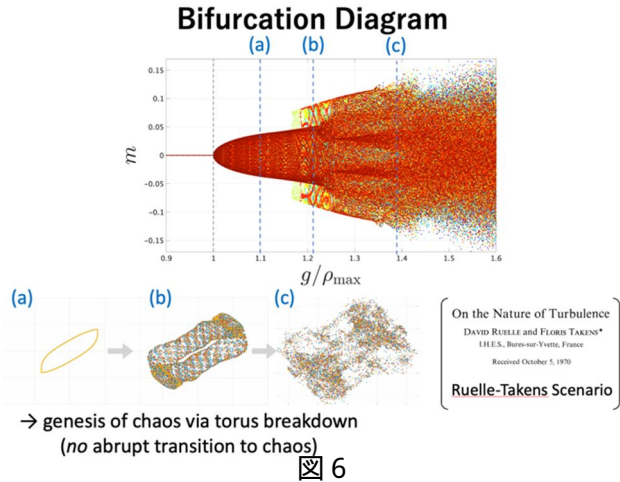
図 5

(3)・(4)は未発表のため省略

(5) 有限サイズランダム神経回路網におけるカオスの発生と統計的スケーリング則
 N個の神経素子がランダムに結合した系

$$\mathbf{x}(t+1) = \tanh(gW^{\text{rec}}\mathbf{x}(t))$$

では、 N の極限(熱力学的極限)において結合行列のスペクトル半径 $g = 1$ で安定固定点からカオス的な状態に遷移することが理論的に知られている。しかし、素子数が有限の状況ではランダム結合系はこの様なクリアな転移は示さず、結合行列と初期値の実現の仕方に依存して固定点から周期運動や準周期運動が発生し、さらに、 g の値の増加と共にトーラス崩壊を経てカオスが発生する(図6)。図6で示された分岐図は、 $N=200$ として、ガウス分布に従うランダム行列 W^{rec} を一つ固定した場合に得られる(異なる初期値から得られるアトラクタを異なる色で表している)。また、異なる乱数列を用いて W^{rec} を作れば異なる分岐図とカオスへの遷移が現れる。そこでランダム行列の実現を変えながら M 個のネットワークを作りある M 個のうち何個のネットワークがカオスを示すかを g の関数として表したのが図7である。このようにシステムサイズ N の増大と共に熱力学的極限であるステップ関数に近づく。そこで、ある N での振る舞いをシグモイド関数でフィットさせ、そのパラメタの N 依存性を見たのが図8である。このように明瞭なスケーリング則に従っていることがわかる。



● Fraction of realizations of W^{rec} and $\mathbf{x}(0)$ exhibiting chaos

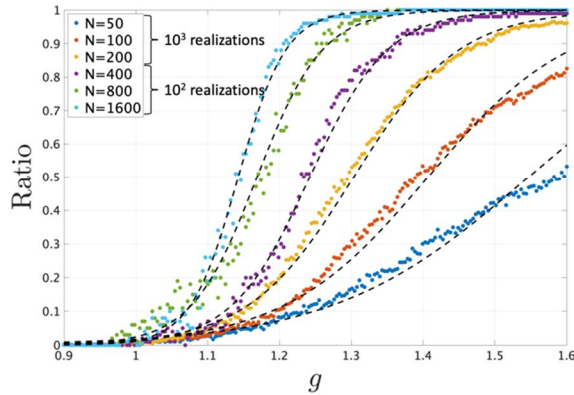


図7

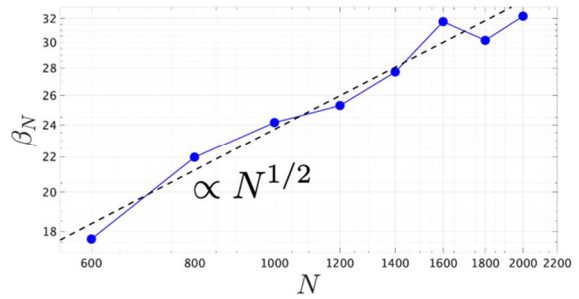


図8

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiromichi Suetani	4. 巻 11731
2. 論文標題 Multiple Pattern Generations and Chaotic Itinerant Dynamics in Reservoir Computing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 76, 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-30493-5_7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Imai, Hiromichi Suetani, and Toshio Aoyagi	4. 巻 91
2. 論文標題 On the Phase Description of Chaotic Oscillators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 14001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.014001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 末谷大道	4. 巻 39
2. 論文標題 リザーコンピュティングと脳	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Clinical Neuroscience	6. 最初と最後の頁 832-835
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 末谷大道、北城圭一
2. 発表標題 リザー計算による脳波モデリングと個人認証への応用
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 末谷大道
2. 発表標題 安定カオスの大偏差原理的性質
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiromichi Suetani
2. 発表標題 Multiple Pattern Generations and Chaotic Itinerant Dynamics in Reservoir Computing
3. 学会等名 28th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 2019): Workshop and Special Sessions (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末谷大道
2. 発表標題 ランダム結合神経回路における安定カオスとその統計的性質
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 末谷大道
2. 発表標題 共時的情報を統合する神経回路網による数知覚の獲得
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末谷大道
2. 発表標題 Acquisition of number sense using neural networks that integrate synchronic information in cognitive experience
3. 学会等名 第45回日本神経科学大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末谷大道
2. 発表標題 有限サイズランダム結合系におけるトーラスの崩壊とカオスの生成
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末谷大道
2. 発表標題 ランダム神経回路における入力に誘起されたアトラクターの次元と一般化同期との関係
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	北城 圭一 (Kltajo Keiichi) (70302601)	生理学研究所・システム脳科学研究領域・教授 (63905)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------