

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21810

研究課題名（和文）レザバー計算を用いた内的時間の獲得と崩壊のメカニズムの探求

研究課題名（英文）Exploring mechanisms of internal time acquisition and collapse using reservoir computing

研究代表者

青柳 富誌生（Aoyagi, Toshio）

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：90252486

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：心の内的時間の獲得の原理や本質は、非自明な数理モデルとして検証するのが難しい研究課題である。本研究では時系列パターンをリカレントニューラルネットワークに学習させる状況設定を想定し、そのために必要な記憶と非線形演算の機能を、自発活動のダイナミクス（入力がない自由な状態）と関連づけて理論と数値実験により詳細に調べた。特に自発活動に着目し、そこへ入力信号の入るニューロンの割合と条件付きリャプノフ指数の関係を動的平均場理論を用いて解析的に調べた。この結果、レザバー機能を発揮するためには、入力信号の強度が一定以上でなければならない、また、入力信号の割合がある臨界値を超える必要があることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の方法は、神経活動の自発的なダイナミクスの特性の観点から、内的時間の獲得メカニズムを理解する新たな視点を提供する。すなわち、レザバー計算の理論を自発神経活動の解釈に応用することの可能性を示すものであり、最終的には脳の時間感覚の理解を一層深めることを可能にすると考えられる。また、工学的応用として現実の大自由度非線形力学系を計算資源として活用する物理レザバー計算への知見の活用が考えられる。本研究の理論的成果は、レザバーとして機能するには、システム全体の一定以上の部分が入力を受け取ることが必要であることを示しており、これは新たな設計指針としての意義がある。

研究成果の概要（英文）：The principles and essence behind the acquisition of internal time within the mind present a challenging research topic, resistant to straightforward validation through mathematical modeling. In this study, we assumed a scenario where a recurrent neural network is trained on time-series patterns and theoretically investigated the required functions of memory and nonlinear operations, associating them with spontaneous activity dynamics without input. We particularly focused on spontaneous activity and analytically examined the relationship between the proportion of neurons receiving input signals and the conditional Lyapunov exponent using dynamical mean field theory. As a result, it became clear that to perform as a reservoir, the intensity of the input signal must be at least a certain level, and the proportion of input signals must exceed a certain critical value.

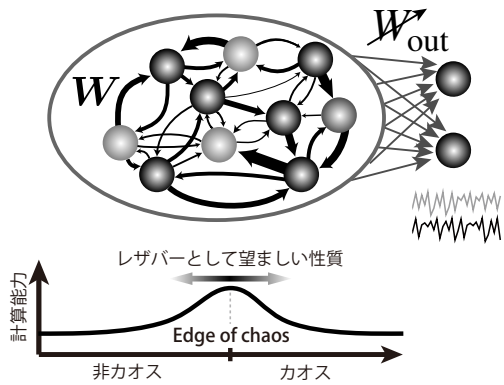
研究分野：非線形物理学

キーワード：レザバー計算 カオス 非線形力学

1. 研究開始当初の背景

内的時間の獲得の原理や本質は、非自明な数理モデルとして検証するのが難しい研究課題である。何もしていない時でも内的時間は経過し脳は活動している。そのような自発神経活動はランダムではなく、学習能力と関係しているという実験的知見がある。同時に、非線形力学系の多様な自発活動を計算資源として活用するレザバー計算に注目が集まっている。レザバー計算はリカレントニューラルネットワークの一種であり、カオスと非カオスの境目 (Edge of chaos) で計算能力が最大になるとされる。研究開始当初の目的は、内的時間の獲得の原理と本質の理解に重きを置いていた。レザバー計算は、リカレントニューラルネットワークの一種であり、カオスと非カオスの境目 (Edge of chaos) で計算能力が最大になるとの先行研究が多数あるが、一方でその領域以外でも計算能力は最大化されるという報告も存在する。内的時間の生成メカニズムには、記憶機能や非線形演算機能が巧みに影響しあうことで実現していると考えられ、まずその基本的特性を自発活動の性質と絡めて明らかにし、それが我々の時間感覚にどのように影響を及ぼすかを理解することが重要である。

レザバーの自発活動と能力

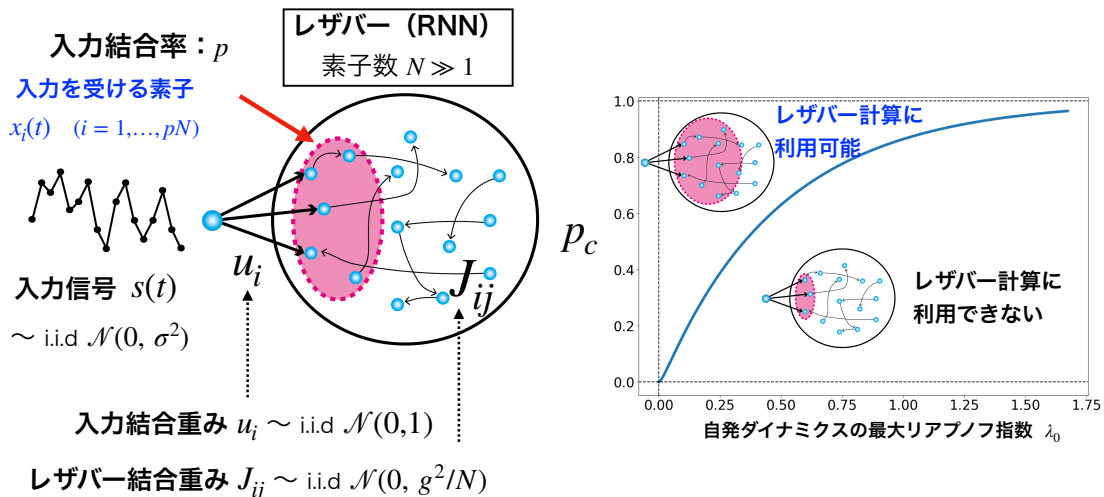


2. 研究の目的

本研究の究極的な目的は、レザバー計算が示す非自明な自発活動とその学習能力との関係性を利用して、内的時間感覚のメカニズムを解明することである。具体的には、自発神経活動と時間的課題への学習能力、特に事象パターンの系列再生との関連性に焦点を当てる準備段階として、自発活動の特徴づけるリヤプノフ指数を理論的に解析し、線形・非線形と記憶に関連する情報処理能力を切り分けて解析することが行われる。自発神経活動は脳の安静時に観察される神経活動で、その性質と動態は時間感覚に深く関連していると考えられる。我々は、この自発的な活動パターンが時間的タスクの遂行や学習にどのように寄与しているかを、レザバー計算の枠組みを活用して段階を追って検証する。レザバー計算の理論を活用することで、内的時間感覚の神経基盤を構成する記憶や非線形演算の諸性質を理論的に研究する。

3. 研究の方法

レザバー計算はリカレントニューラルネットワークの一種であるが、非自明な自発活動を示し、その活動状態がカオスと非カオスの境目 (Edge of chaos) で課題実行のための計算能力が最大になるという知見がある。また、一定時間後にパターンを出力するタイマタスクも学習可能であり、その学習能力も Edge of chaos で最大となる。本研究では、レザバー計算が次の2つ実験的知見 (1) 非自明な自発活動を示し、その特性は学習能力と関係がある (2) 事象パターンの系列再生など時間的な課題を学習可能、と類似性があることに着目し、その枠組みを内的時間獲得のメカニズムを探る研究として活用することを試みた。レザバー計算の概要を以下に述べる。  
 ① レザバーとよばれるランダム結合したリカとよばれるランダム結合したリカレントニューラルネットワークを用意する ② レザバーの全ニューロンの状態の線形和を出力として、目的の時系列を再現するように出力とレザバー間の線形結合のみを学習する。レザバー内の結合は固



定してあり、課題に依存した学習による更新は行わない。

#### 4. 研究成果

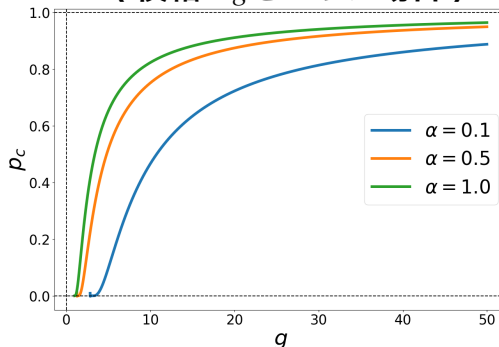
初年度は、記憶と演算の両方を必要とする課題 (3bit Boolean emulation task) を、連続時間リカレントニューラルネットワークをレザバーとするレザバー計算機に学習させ、入出力関係が線形分離可能な場合と、線形分離不可能な場合とでパフォーマンスの違いがあるかどうかを調べた。また、レザバーの最大リアプノフ指数の入力依存性をしらべ、タスクのパフォーマンスを定性的・定量的に評価することを試みた。結果として、ビットパターンの識別能力に関して、極めて一般的な設定である記憶と演算の両方を要する課題 (3bit Boolean emulation task) が十分学習可能であることが数値計算により示された。結果として、やはりカオス・非カオスの境界付近でパフォーマンスが良く、入力信号の有無でリアプノフ指数が正から0付近に変化するような傾向が見られた。パターン系列学習に関する基本的な性質を精査でき、次の段階へ研究を進める準備が完了した。

次年度は、その理論的解析のため記憶容量と非線形性の関係を計算論的に議論した論文などを参考に予備的解析を進めた。直接的な解析は難しい状況であるが、その検証過程で自発ダイナミクスがカオスであるリカレントニューラルネットワークをレザバーとする系の Echo State 特性について理論的に解析結果が得られた。具体的には、カオスニューラルネットワークのランダムな時系列入力に対する条件付き最大リアプノフ指数を、動的平均場理論を用いて解析的に求め、入力信号を大きくすると最大リアプノフ指数が減少することを示した。入力層と結合しているリカレントニューラルネットワークの素子の割合にはある臨界値が存在し、臨界値より小さい場合は、どのようにしても最大リアプノフ指数を負にできないこと、すなわちレザバーとして学習が不可能であることを示した。またその臨界値は、リカレントニューラルネットワークの自発ダイナミクスのカオスが強いほど大きくなることを明らかにした。逆に言えば、入力結合率を臨界値よりも大きく設定すれば、入力信号を適切に増幅することでカオスニューラルネットワークをレザバー計算として利用できることがわかった。更に、本質的に自発発火を抑えられるかは、リカレントネットワークのスパース性が直接効いているのではなく、スパース性が自発発火活動の最大リアプノフ指数を通じて影響を与えていることが判明した。実際に臨界結合強度との関係を理論的に調べたところ、上図のように、最大リアプノフ指数を横軸にとれば、スパース性の指標  $\alpha$  が異なってもユニバーサルな曲線として表せることが示された。最後に、本研究の結果を別の言い方で言えば、この結果は、レザバーとして機能するためにはニューラルネットワーク全体に対して一定以上の割合の素子が入力を受けなければならないことを意味し、学習能力向上の一つの指標となる大変意味のある結果であり、レザバー計算の新たな設計指針となることが期待できる。

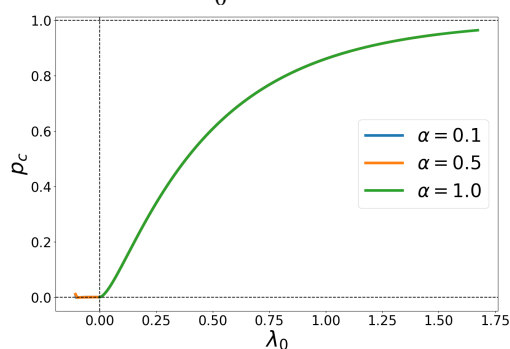
最終年度では、これまでの研究成果を基に、ニューロンの非線形性が記憶タスクと非線形演算能力にどのように影響を及ぼしているのかを数値計算により調査しました。具体的には、ニューラルネットワークのどの部分の非線形性が記憶タスクと非線形演算能力に効いているのか、数値計算により調べた。意外な結果として、"Edge of chaos" という状態で性能が最大化する領域ではニューロンの非線形性が何処にあるかには依存しないことが判明した。自発発火と演算能力 (記憶と非線形演算) を適切に切り分けて理解できたことは、内的時間獲得の原理の基礎理論の構築にとって意義深いと考えられる。

本研究の方法は、神経活動の自発的な特性を模倣することで、内的時間の獲得メカニズムを理解する新たな視点を提供する。また、それはレザバー計算の理論を自発神経活動の解釈に応用することの可能性を示すものであり、最終的には脳の時間感覚の理解を一層深めることを可能にすると考えられる。一方、現在のモデルでは、自発神経活動と学習能力との関連性を確認することができましたが、自発神経活動がどのようにして時間の経過を表現するのか、そのメカニズムについては解明まで至らなかった。この結果を基礎に内的時間獲得のメカニズムを解明することは、次なる研究課題として残されている。

〈横軸に  $g$  をとった場合〉



〈横軸に  $\lambda_0$  をとった場合〉



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Imai Takashi, Suetani Hiromichi, Aoyagi Toshio	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 the 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 荒井貴光, 河村洋史, 青柳富誌生,	4. 巻 120
2. 論文標題 集団振動を示す振動子集団間の相互作用に関する位相縮約の統計的手法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 13-18
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 -
1. 著者名 青柳 富誌生	4. 巻 2021年 7月号
2. 論文標題 変化するネットワーク力学系 複雑な現象を理解する切り口として	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Clinical Neuroscience	6. 最初と最後の頁 816-821
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 -
1. 著者名 Ota Kaiichiro, Aihara Ikkyu, Aoyagi Toshio	4. 巻 7
2. 論文標題 Interaction mechanisms quantified from dynamical features of frog choruses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 191693 ~ 191693
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsos.191693	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Takuma, Nakajima Kohei, Aoyagi Toshio	4. 巻 156
2. 論文標題 Effect of recurrent infomax on the information processing capability of input-driven recurrent neural networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neuroscience Research	6. 最初と最後の頁 225 ~ 233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neures.2020.02.001	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 青柳 富誌生	4. 巻 42
2. 論文標題 最先端研究：リズムの相互作用を時系列データから推定する	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 シミュレーション	6. 最初と最後の頁 31 ~ 37
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13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 荒井貴光, 河村洋史, 青柳富誌生
2. 発表標題 統計的位相縮約による振動子集団間の相互作用推定
3. 学会等名 2021年度生理研研究会「第3回 力学系の視点からの脳・神経回路の理解」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高須正太郎, 青柳富誌生
2. 発表標題 レザバー計算機の計算性能とレザバーの力学系的性質の関係の検討
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 荒井貴光, 河村洋史, 青柳富誌生
2. 発表標題 時空間リズムを示す反応拡散系間の相互作用推定
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 平均振動数の異なる複数の振動子集団の結合系が示す位相振幅同期現象
2. 発表標題 宮平佳明, 今井貴史, 青柳富誌生
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 渡邊直太, 青柳富誌生, 合原一究
2. 発表標題 遺伝アルゴリズムを用いたオスガエルの発声行動戦略のモデル選択
3. 学会等名 日本生態学会第69回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原大悟, 青柳富誌生
2. 発表標題 位相ダイナミクスに関する諸特性のガウス過程による推定
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒井貴光, 河村洋史, 青柳富誌生
2. 発表標題 振動子集団間の相互作用に関する統計的位相縮約の手法
3. 学会等名 2020年度日本数理生物学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒井貴光, 河村洋史, 青柳富誌生
2. 発表標題 集団振動を示す振動子集団間の相互作用に関する位相縮約の統計的手法
3. 学会等名 生理学研究所研究会 第2回「力学系の視点からの脳・神経回路の理解」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒井貴光, 河村洋史, 青柳富誌生
2. 発表標題 集団振動を示す結合素子ネットワークの間の相互作用推定
3. 学会等名 第30回日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒井貴光, 河村洋史, 青柳富誌生
2. 発表標題 集団振動を示す振動子集団間の相互作用に関する位相縮約の統計的手法
3. 学会等名 非線形問題研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒井貴光, 河村洋史, 青柳富誌生
2. 発表標題 多自由度リズム力学系間の相互作用推定について
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 高須正太郎, 青柳富誌生
2. 発表標題 レザパー計算機におけるレザパーのカオス性と非線形タスク処理性能の関係
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 藤原大悟, 青柳富誌生
2. 発表標題 位相ダイナミクスにおける相互作用関数のガウス過程による推定
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021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

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
---------	---------