

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：32620

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19882

研究課題名（和文）拡散結合系のカオスのレザバーコンピューターへの応用と小脳顆粒細胞層の計算論の構築

研究課題名（英文）Application of Chaos in Diffusive Coupling Systems to Reservoir Computing and Construction of Computational Theory for the Cerebellar Granular Layer

研究代表者

徳田 慶太（Tokuda, Keita）

順天堂大学・健康データサイエンス学部・准教授

研究者番号：50762176

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目的は、小脳顆粒細胞層におけるギャップジャンクションが時空カオスを引き起こし、それが適切な情報表現を可能にしているという計算論的仮説を提唱し検証することであった。数理モデルを用いた解析により、ギャップジャンクションの導入により表現の複雑性の向上が示された。さらに、出力パターンの複雑性を保ちながら、安定して同一入力に対して同一出力を出す能力の条件も理解された。一方で、系のカオス性が強い場合、出力パターンの複雑性が上がるが、初期値依存性が強くなり、汎化能力とのトレードオフが明らかになった。この問題解決のため、外部入力の振幅に時間的周期性を持たせることでシステムを安定化させる着想を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小脳の顆粒細胞層は、情報が入力する部分であり、その情報処理を明らかにすることは、小脳の機能の理解にとって必要不可欠なことである。本研究では、小脳の顆粒細胞層に大量に存在するギャップジャンクションの機能的な役割について仮説を立て、数理モデルを用いた理論的な解析により、その論理的な整合性を検証した。強い非線形性を持つ神経系において、解剖学的な構造であるギャップジャンクションの存在が、どのようなダイナミクスの生成につながり、さらにはどのような情報処理につながるのかを理解するためには、数理モデルを用いた研究が必須であった。本研究の成果が、中枢神経系の生理や病理を解明するために今後貢献すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research project was to propose and verify a computational hypothesis that gap junctions in the granular cell layer of the cerebellum induce spatiotemporal chaos, which enables appropriate information representation. Through mathematical model analysis, it was demonstrated that the introduction of gap junctions enhances the complexity of representations. Furthermore, the conditions for achieving the ability to produce the same output for the same input consistently while maintaining the complexity of output patterns were also understood. On the other hand, under strong chaos, the complexity of the output patterns increases, but the system's dependence on initial conditions also becomes stronger, revealing a trade-off with generalization ability. To address this issue, we conceived the idea of stabilizing the system by introducing temporal periodicity in the amplitude of external inputs.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：小脳 カオス ギャップジャンクション レザバー計算

## 1. 研究開始当初の背景

計算論的神経科学における多くの理論において、小脳は入力層である顆粒細胞層に届く特定の時空間パターンに対する特定の時空間パターン出力を教師あり学習で獲得する装置であるとされてきた。例えば、代表的な小脳依存的学习である瞬目反射学習においては、特定の感覚入力に対して、ミリ秒レベルの正確な時間で特定の運動応答を実現する反射弓が小脳内に構成されると考えられている。このような処理を行うためには、様々な入力に対して特異的に、かつ時間的に変化する神経活動が必要である。小脳の入力層である顆粒細胞層は莫大な数存在する顆粒細胞と同在抑制性神経のゴルジ細胞から主に構成されており、入力パターンを高次元の移ろいゆくダイナミクスに変換することで高い表現力を実現し、このような処理を可能にしていると考えられてきた。中でも、小脳をレザバコンピュターとして捉え、顆粒細胞層がそのレザバであるとする議論が先行研究でなされてきた。レザバコンピュティングとは、入力を多様なダイナミクスを含む高次元の非線形力学系に与えることで高次元時空間パターンに写像したのち、レザバからの出力層だけを教師あり学習で学ばせる機械学習の枠組みの一つである。モデルの性能を決めるレザバがどのような性質を持つべきであるかは重要な問題として議論されているが、未だよくわかっていない。

一方で、小脳ゴルジ細胞は、隣接する細胞同士が80%以上の確率でギャップジャンクション(GJ)で強く結合しており、このGJ結合がゴルジ細胞同士の発火を脱同期させる効果を持っていることなどが近年実験的に報告されていた。GJは細胞間を直接つなぎ、細胞内のイオンなどが細胞間で拡散移動できる構造である。しかし、その計算論的意義は明らかでなかった。また一方では、力学系の理論においては、GJによる拡散結合は、非線形システムにおいて必ずしも同期だけではなく、脱同期をもたらすカオス的な解を生じさせることが知られてきており、この理論が報告された生理学的な実験事実を説明すると共に、顆粒細胞層における新たな計算論を構築する可能性があるという着想を研究代表者は得ていた。

そこで、GJ結合系のカオスが顆粒細胞層における高度な情報表現の実現に寄与しているという仮説は検証すべき価値を持っていると考えた。さらに、レザバに拡散に誘導されたカオスを用いることでレザバとして望ましい性質を実現できるという仮説の検証にもなり、情報工学的な観点からも重要な問いであると考えた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、「小脳顆粒細胞層におけるGJが時空カオスを引き起こし、それが入力の適切な情報表現を可能にしている」という、計算論的な仮説を検証することとした。そのために、小脳をレザバコンピュティングのアーキテクチャとして捉え、レザバを構成する顆粒細胞層にGJを導入することがモデルの精度に寄与するかどうかを検討することとした。

## 3. 研究の方法

本研究では、小脳顆粒細胞層の微分方程式モデルを構築し、GJの導入が系に与える影響を解析した。具体的な方法としては、以下の解析を行った：

- 微分方程式モデルの構築：小脳顆粒細胞層の動態を記述する数理モデルを作成し、GJの導入による変化を解析した(図1)。
- シミュレーション：構築したモデルを用いてシミュレーションを行い、カオス的なダイナミクスの発生を確認した。
- パラメータ解析：GJのコンダクタンスや外部入力の特性が系のダイナミクスに与える影響を調査した。
- リアプノフ指数、アトラクタ次元、Echo state property, スペクトル半径などの、力学系の観点からの系の特徴づけとモデルの性能の関係について解析した。

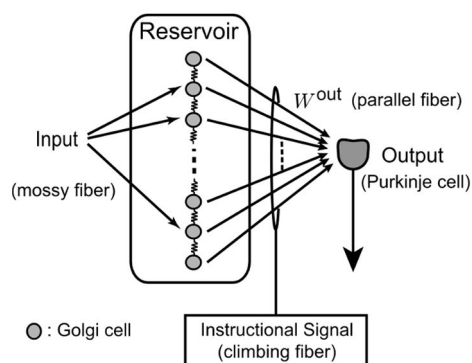


図 1. リザーバによる小脳顆粒細胞層のモデル (Neural Networks 136 (2021) 72-86)

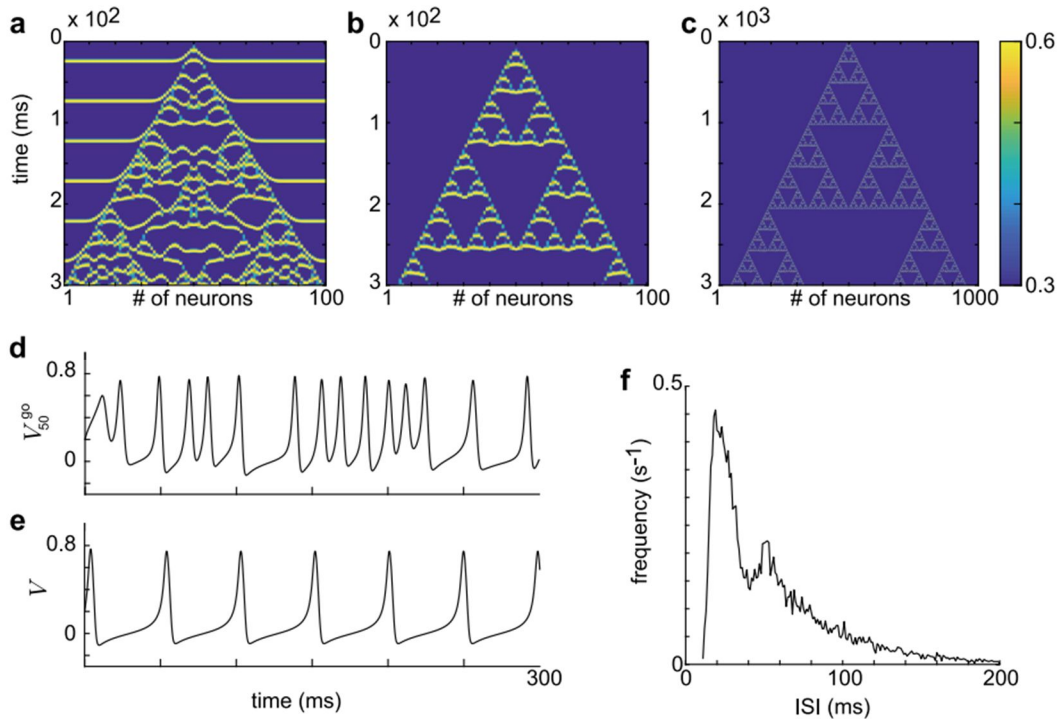


図 2. リザーバーにおけるギャップ結合によって引き起こされたカオス。(a) 小さな正のトニック入力を持つモデルの動態。カラーマップは膜電位の動態を示す。(b-c) 小さなトニック抑制のもとで現れるシェルピンスキーガスケット。(d) パネル (a) の 50 番目のニューロンの膜電位の時間変化。(e) 小さな正のトニック入力のもとで孤立したモデルニューロンの周期的活動。(f) カオス動態におけるニューロンの ISI の広い分布。(Neural Networks 136 (2021) 72–86)

#### 4. 研究成果

##### (1) ギャップ結合によって引き起こされるスパイク間隔の広い分布

ギャップ結合の導入によりカオス的なダイナミクスが生じ、その結果、モデル内のニューロンのスパイク間隔 (ISI) の分布が広がった。具体的には、拡散結合がニューロン間の同期を崩し、周期的な活動からカオス的な活動へと移行させることで、ISI の分布が広がったことが示された。このカオス的な活動により、ニューロンのスパイク間隔が広範囲にわたって分布し、特定の時間間隔に依存しない多様なスパイクパターンが観察された (図 2)。結果として多様な時間スケールでの応答を引き起こすことが確認された。

##### (2) リザーバー内のギャップ結合は、広範囲の周波数を持つターゲットパターンの生成を実現する

ギャップ結合を導入することで、リザーバーの表現能力が向上し、広範囲の周波数成分を含む複雑な出力パターンを生成できるようになった。図 3 にあるように、異なる周波数の正弦波をターゲットパターンとした場合、ギャップ結合があるとモデルの出力精度が向上することが示された。ギャップ結合の強度を調整することで、リザーバーが広範囲の周波数に対して適応的に反応できることが明らかにされた。この結果、リザーバーは多様な周波数成分を含む信号を効果的に処理し、出力する能力を持つことが確認された。これにより、ギャップ結合がリザーバーの機能的多様性を高める重要な要素であることが示された。

##### (3) リャプノフ次元と nRMSE の逆相関

リャプノフ次元と nRMSE の間には逆相関があることが示された。具体的には、ギャップ結合の強度の値によってカオス的な活動が引き起こされ、リャプノフ次元が大きい領域においては、モ

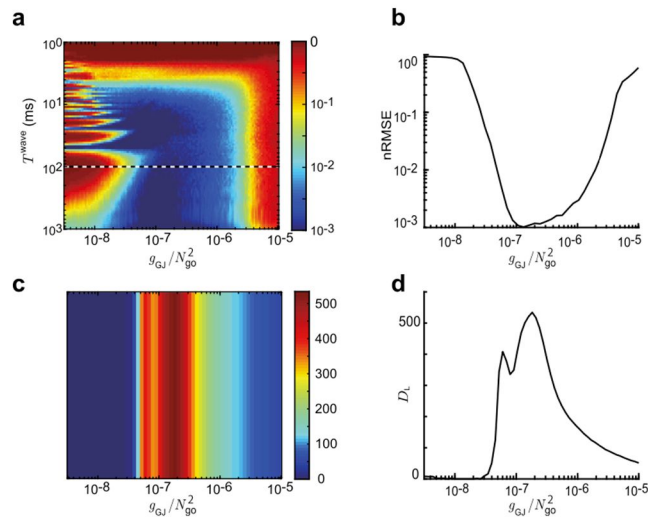


図 3. nRMSE のターゲットパターンの周期  $T^{\text{wave}}$  とギャップ結合の強度  $g_{\text{GJ}}/N_{\text{go}}^2$  への依存性。(a) nRMSE は様々な  $T^{\text{wave}}$  と  $g_{\text{GJ}}/N_{\text{go}}^2$  の値にわたって対数スケールで示されている。カラーマップは nRMSE 値を示す。(b)  $T^{\text{wave}} = 100 \text{ ms}$  のターゲットパターンに対する nRMSE 値を  $g_{\text{GJ}}/N_{\text{go}}^2$  に対してプロットしたもので、(a) パネルの破線で示された部分に対応している。(c) リャプノフ次元を  $g_{\text{GJ}}/N_{\text{go}}^2$  に対して示すカラーマップ。(d) リャプノフ次元を  $g_{\text{GJ}}/N_{\text{go}}^2$  に対してプロット。(Neural Networks 136 (2021) 72–86)

デルの出力精度を示す nRMSE が低下することがわかった(図 3)。この結果は、カオス的なダイナミクスがリザーバーの表現能力を向上させることを示唆している。実験結果から、リャプノフ次元が高い場合、リザーバーはより複雑な入力パターンに対して高い精度で出力を生成できることが明らかにされた。

- (4) リザーバー状態は特定の入力からの時間の経過を表す。この結果は、初期条件が異なる場合に、モデルが固定されたリードアウト接続で完全に異なる時間パターンを生成できることを示している

ギャップジャンクション結合系のリザーバーの状態は、初期条件に応じて異なる時間パターンを生成することが確認された。これは、系が特定の入力からの時間の経過を表現する能力があることを示しており、小脳顆粒細胞層の機能として望ましい性質だと考えられている。この性質により、同じリードアウト接続を用いても、初期条件が異なれば完全に異なる時間パターンを生成することができることが示された。

- (5) 異なる入力に対する異なる活動の生成

リザーバーは異なる入力に対して異なる活動パターンを生成する能力があることが示された。特に、同じリードアウト接続を用いても、異なる入力パターンに対しては異なる出力パターンを生成することができた。この特性により、リザーバーは多様な入力に対して柔軟に対応できることが明らかにされた。実験では、リザーバーに対して異なる入力信号を与えることで、それぞれに対応した異なる動的出力パターンが生成された。この結果は、リザーバーが入力依存の応答を高い精度で生成する能力を持つことを示している。また、この特性がリザーバーコンピューティングの適用範囲を広げる要因となることが確認された。

- (6) レザーバーに Echo state property を持たせ、汎化能力を持たせるための着想

系のカオス性が強い場合には、出力できるパターンの複雑性が上がるが、同時に系の初期値依存性が強くなるため、汎化能力とのトレードオフがあることが明らかになった。この問題を解決するために、外部入力の振幅に時間的周期性を持たせることにより、システムを引き込むという着想を得た。この方法は、カオス的な神経回路に、同期した神経活動入力によって特定の応答をさせることができるという、新しい計算原理を示唆している可能性があると考えられる。

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 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 藤本ありさ、山本英明、守谷哲、徳田慶太、香取勇一、佐藤 茂雄	4. 巻 2022-B10-70
2. 論文標題 Optimization of recurrent neural network structure by controlling symmetry of weight matrix	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 研究報告バイオ情報学	6. 最初と最後の頁 1-5
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 Raab Maximilian、Zeininger Johannes、Suchorski Yuri、Tokuda Keita、Rupprechter Guenther	4. 巻 14
2. 論文標題 Emergence of chaos in a compartmentalized catalytic reaction nanosystem	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-36434-y	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 該当する

1. 著者名 Tokuda Keita、Fujiwara Naoya、Sudo Akihito、Katori Yuichi	4. 巻 136
2. 論文標題 Chaos may enhance expressivity in cerebellar granular layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 72～86
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neunet.2020.12.020	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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			
オーストリア	TU Wien			