

立教大学学術推進特別重点資金（立教 S F R）  
大学院学生研究  
2024年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院	人工知能科学研究科	人工知能科学専攻
研究代表者 (2025年3月現在のものを記入)	在籍課程・学年	氏名	
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年 <input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 2年	小山一樹	
指導教員	所属部局・職名	氏名	
	人工知能科学研究科・教授	大西立頭	
自然・人文・社会の別	自然	個人・共同の別	個人
研究課題	リカレンスプロットと深層学習を用いた非線形ダイナミクスによるマウス脳波時系列解析		
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2025年3月現在のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年	氏名	
	研究代表者 人工知能科学研究科・人工知能科学専攻・博士後期課程・2年	小山一樹	
研究期間	2024年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 250,000円 / (採択金額) 250,000円		

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)
当該研究の研究目的を含むこと。 マウスの脳波時系列データを用いて、リカレンスプロットと深層学習を用いた睡眠状態の新定義を本研究の目的とする。一般にヒトでの解析が主になされている一方で、マウスを用いた基礎研究はヒトと比較すると少なくなっている。カオス解析で使われる埋め込みを基礎としたリカレンスプロットと、活性化関数とプーリング層を重ね合わせた深層学習の2種類の手法を脳波時系列の解析に用いる。異なる角度からの非線形な特徴量に変換し、従来の周波数帯を基礎とした手法とは異なるアプローチから睡眠時の脳状態の新たな定義を行う。
キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)
[非線形時系列解析] [脳波時系列] [複雑系科学]

**研究成果の概要** (図・グラフ等は使用しないこと。)

以下の視点を含めて記載のこと。

- ・当該研究は何をどこまで明らかにできたのか (できなかったのか)。
- ・何をもって研究成果 (経過) を達成できた (できなかった) と考えられるのか。  
自身が設定した研究目的・目標に照らして、その根拠がわかるよう記載のこと。

**【背景】**

本研究では大規模な計算を用いて 400 匹のマウスの睡眠時の脳波時系列から睡眠状態の新たな定義を行う。リカレンスプロットから時系列のカオス的な特徴量を抽出し、さらに深層学習で多層的に活性化関数やプリーング、畳み込みカーネルを組み合わせ、線形層と非線形層を重ね合わせた特徴量を抽出する。時系列を特徴量空間で表現することで、周波数解析などの従来手法では得られない知見の創出を行う。

睡眠時の脳波時系列の解析は幅広く行われているものの、計測の対象は多くがヒトであるため生体データ特有の多大なノイズの影響や、データ取得の手間や困難さなどが原因となって、睡眠の基礎研究は発展途上である。そのため睡眠と深く関わる病態や、睡眠機能そのものの仕組みといったものは未だ解明されていない。生体データのような複雑な時系列の多くは決定論に基づいたカオス的な振る舞いをするものが知られているもの[J. Faber *et al.*, *Sci. Rep.*, 2018]、計算コストの高さを背景に十分な解析は行われていない。一般的に正弦波の重ね合わせを仮定したパワースペクトルなどが解析の中心となっており、周波数帯の強さなどに応じて脳活動が分類されている。パワースペクトルを用いた睡眠状態の定義方法としては、睡眠時の脳波時系列のパワースペクトルの時間変化に注目したものが知られている[M. S. Idelson *et al.*, *Science*, 2016]。しかし、生体データの計測には付随するノイズ、個体差、状態変化による非定常性の影響があるため、パワースペクトルによる解析手法では正確な分析結果が得られない。

カオス的な振る舞いに着目して非線形時系列解析を適用した研究では、埋め込み次元を脳波時系列から推定した研究[S. Janjarasjitt *et al.*, *Clinic. Neurophys.*, 2008] や、埋め込み次元を用いた睡眠状態の予測[M. Xiao *et al.*, *Biomed. SignalProc.*, 2013] がある。脳波時系列の埋め込み次元については幅広く研究されており、睡眠時の幼児や成人だけでなく、アルツハイマー病やうつ病の患者の相関次元についても研究されている[J. Jeong *et al.*, *EEG and Clinic Neurophys.*, 1998]。リカレンスプロットでは、リアプノフ指数やコルモゴロフ複雑度といった、非線形ダイナミクスに関する単純な指標では得られない情報が得られる。埋め込みを利用した時系列解析手法であるリカレンスプロットには時系列の持つ情報が保存されているものの、埋め込み次元を適切に推定することは困難であるため、解析手法として採用されてこなかった。

**【結果】**

本期間の研究においては、埋め込みに必要なパラメータの推定を順列エントロピーを用いて推定を行った。これまでの脳波時系列に対して埋め込みという時系列解析手法を用いることで、アトラクターと呼ばれる位相空間上での脳波時系列の特徴的な位相構造を抽出することができる。埋め込みを行った脳波時系列からリカレンスプロットを計算することで、脳波時系列を異時刻間の関係性をもとにした 2 次元の脳波時系列へと変換する。リカレンスプロットでは埋め込み次元と遅れ時間という 2 つのパラメータを推定することが必要であるが、ノイズの影響を強く受ける脳波時系列でパラメータを推定する場合、相関積分や自己相関関数など一般的な方法では最適なパラメータの推定が困難である。そこで、ノイズにロバストなパラメータ推定方法である順列エントロピーを用いたパラメータ推定方法を採用する。順列エントロピーは値を順位に変換することで、ノンパラメトリックかつノイズの影響を受けにくい時系列のエントロピーとなっている。また順列エントロピーの計算と埋め込みの操作には類似点があり、非線形時系列解析との親和性が高くなっている。順列エントロピーを計算して得た結果を元に、すべてのマウスに対するパラメータの推定を行った。

研究成果の概要 (つづき)

※この(様式2)に記入の成果の公表を見合わせる必要がある場合は、その理由及び差控え期間等を記入した調書(A4縦型横書き1枚・自由様式)を添付すること。

**研究発表** (研究によって得られた研究成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。なお、成果発表を確認できる資料を合わせて研究成果報告書提出フォームより提出してください(紙媒体等、研究成果報告書提出フォームから提出できない場合は、別途リサーチ・イニシアティブセンターへ提出してください)。

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

※修士論文・博士論文は含みません。

**④ 学会発表**

1. Kazuki Koyama, Masanori Sakaguchi, Takaaki Ohnishi. A Noise-Robust Approach to Estimate Dimension of Sleep EEG in Mice Using Permutation Entropy. In: 2024 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Yokohama, Japan, 1-8, June 30th - July 5th, 2024.
2. Kazuki Koyama, Masanori Sakaguchi, Takaaki Ohnishi. Jensen-Shannon Complexity for measuring deterministic properties of mouse EEG. Conference on Complex Systems 2024, Exeter, UK, September 2nd - 6th, 2024.
3. Kazuki Koyama, Masanori Sakaguchi, Takaaki Ohnishi. Classification of Sleep Stages Based on Quantile Graphs from Mouse EEG. The 13th International Conference on Complex Networks and their Applications, Istanbul, Turkey, December 10th - 12th, 2024.
4. Kazuki Koyama, Masanori Sakaguchi, Takaaki Ohnishi. Quantifying Causal Dynamics of Mouse EEG in Sleep States Using Symbolic Transfer Entropy. Dynamics Days 2025, Denver, (U.S.), January 3rd - 5th, 2025.