

千葉工業大学、大脳皮質の皮質間構造を模したスパイクニューラルネットワークを開発

--- ロングテールな神経活動の生成メカニズムの解明と人工知能への応用を期待---

学校法人 千葉工業大学 情報科学部 情報工学科 信川創 准教授、同学科 安藤 聖 (2018年3月卒)と公立大学法人 兵庫県立大学 大学院 応用情報科学 研究科 西村治彦 教授、学校法人 東邦大学 理学部 情報科学科 我妻伸彦 講師、学校法人金井学園 福井工業大学 AI & IoT センター/環境情報学部 経営情報学科 山西輝也 教授は、大脳皮質の皮質間構造を模したスパイクニューラルネットワークを開発しました。このスパイクニューラルネットワークは、脳機能の創発に寄与するロングテールな神経活動の生成メカニズムの解明と人工知能への応用が期待されます。この成果は米国に本部を置く電気・通信・情報工学の学術研究団体であるIEEEの学術雑誌、IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems (インパクトファクタ 12.179 (2018/2019年))にて発表されました。

【概要】

脳の様々な階層レベルにおいて、ロングテール(※1)な特徴を持った神経活動が観察されます。この神経活動の存在は、知覚・学習・認知などの脳機能を支える重要な神経基盤の1つであり、このロングテールな神経活動の生成メカニズムを解明する研究が進められています。また、近年、次世代の人工知能として脳の神経活動を模した技術が注目されており、神経活動を発火レベルで再現するスパイクニューラルネットワーク(※2)の学習性能向上に、このような神経活動の時空間特性(発火のタイミングや位置)が利用できるという研究成果が報告されています。このように、ロングテール性の生成メカニズムとその機能性の解明は、神経科学・人工知能研究の両領域において、重要な研究テーマの1つです。今回、信川と安藤らは、大脳皮質に見られる皮質間結合とシナプス結合強度のロングテール性の構造をスパイクニューラルネットワークに組み込むことで、ロングテールな特徴を持った神経活動の生成に成功しました。

【発表内容】

+ 背景

近年の脳波や脳磁図、機能的核磁気共鳴などの脳機能画像技術を活用した研究により、脳機能を支える時空間的な神経の発火のゆらぎの役割が明らかになってきました。また、脳の神経回路の構造を詳細に調べることのできる拡散テンソル画像技術により、脳の神経回路が複数の階層レベルでのフィードバック構造やスモールワールド性などの複雑ネットワーク特性を持つことが明らかになっています。さらに、神経回路の構造的特性と脳における神経活動の時空間特性、知覚・学習・認知などの脳の機能特性の3者に共通する特性として、ロングテール性が挙げられます。神経活動のロングテール性は、知覚・学習・認知などの脳機能を支える重要な神経基盤の1つであり、このロングテール性の生成メカニズムを解明する研究が進められています。しかし、どのように神経回路の構造的ロングテール性が、脳の神経活動や脳機能におけるロングテール性の生起に寄与するのかについては、まだよくわかっていませんでした。

+ 研究内容

信川と安藤らは、ニューロン間を繋ぐ興奮性シナプス結合(※3)の強度(EPSP: 興奮性シナプス後電位)の分布のロングテール性と大脳皮質の皮質間結合の構造を模した2つ神経モジュールから成るスパイクングニューラルネットワークを構築しました(図1を参照)。その結果、EPSPの強度分布のロングテール性を持ち且つ、適度な結合強度で皮質間結合が存在する場合に、神経モジュールが間欠的に活性・非活性状態を繰り返すモジュール間オルタナティブ挙動(図2)が生起し、その挙動が神経活動のロングテール性を生み出すことが明らかになりました(図3)。さらに、モジュール間オルタナティブ挙動の生成メカニズムを神経活動の同期解析によって分析したところ、次のような生成メカニズムが明らかになりました。

- モジュール間オルタナティブ挙動において、神経モジュール内に存在する興奮性・抑制性ニューロン集団の神経活動の同期により、対応する神経モジュールが活性状態となる。
- EPSPのロングテール性に起因する神経活動のゆらぎによって、同期が非同期状態に遷移することで非活性状態となる。
- 皮質間の結合によって生じる神経モジュール間の抑制性ニューロン集団の同期により、活性・非活性状態がオルタナティブに神経モジュール間で切り替わる。

このような結果は、知覚競合などの心理実験で現れる知覚交替の時間特性と一致しており、さらに抑制性ニューロン集団の同期挙動が記憶の形成や知覚処理に重要な役割を担うという知見を支持する結果となっています。

+ 社会的意義・今後の予定

本研究の意義について、第1に神経科学的視点からと第2に人工知能技術的視点から説明します。第1に、神経回路の構造的ロングテール性から、神経活動の機能的ロングテール性が生成される機構の1つを明らかにした点です。この機構を元に、今後全脳レベルでの神経システムが構築されれば、知覚・学習・認知などのプロセスにおいて多様で柔軟性に富んだ脳機能を支える神経基盤の解明の一助となることが期待されます。第2に、神経活動の機能的ロングテール性が、次世代の人工知能技術である神経活動を発火レベルで再現するスパイクングニューラルネットワークの学習性能向上に寄与する可能性がある点です。スパイクングニューラルネットワークは、現在普及している形式ニューロン(神経活動の平均発火率を記述した単純な神経モデル)に基づいた deep learning 技術と比較して、低消費電力で人工知能の機能を実現できることから、世界的に回路実装や学習アルゴリズムが研究されています。しかし、これらのスパイクングニューラルネットワークのほとんどは、実際の神経ネットワークの再帰構造や複雑な神経ダイナミクスを無視したものがほとんどです。それに対して、近年、複雑な時空間特性を持った神経活動が、このスパイクングニューラルネットワークの学習性能を向上させることが報告されており、神経活動のロングテール性をはじめとする複雑な神経ダイナミクスに注目が集まっています。今後、本研究で開発したロングテールな神経活動を生成する神経モジュールの機能性を研究していくことで、このような人工知能技術への適用が可能になると期待されます。

+ 発表雑誌

雑誌名: IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems (公開日: XX 月 XX 日)

論文題目: Long-Tailed Characteristic of Spiking Pattern Alternation Induced by Log-Normal Excitatory Synaptic Distribution

著者: Sou Nobukawa, Haruhiko Nishimura, Nobuhiko Wagatsuma, Satoshi Ando, Teruya Yamanishi

URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9173726> (オープンアクセスのためこのサイトから閲覧できます)

+ 謝辞

本研究は科研費 若手研究 (18K18124) (研究代表者: 信川創)及び、基盤研究(C)(18K11450)(研究代表者: 山西輝也)の助成を受けたものである。

+ 用語説明

- ※ 1 ロングテール性: 確率分布の裾が、指数関数的な減衰をせずに、数オーダーに亘って穏やかに減衰する確率分布の性質。対数正規分布やガンマ分布などの確率分布がこの性質を持つ。
- ※ 2 スパイキングニューラルネットワーク: 脳・神経系の神経細胞(ニューロン)は、急峻な膜電位の上昇である発火によって情報処理の伝達を行っている。スパイキングニューラルネットワークはこの発火のダイナミクスをモデル化した生理学的なニューロンに近い挙動を示すニューロンモデル。尚、現在、広く普及している **deep learning** の技術のほとんどは、この発火そのものではなく、平均発火率に対応した量をモデル化した形式ニューロンに準ずる単純化されたニューロンのモデルが使われている。
- ※ 3 ニューロン間の結合では一方のニューロンから他方のニューロンにシナプスという構造を介して情報が伝達される。シナプスには情報を受け取る側のニューロン(ここでは他方のニューロン)を興奮させる「興奮性シナプス」と、興奮を抑える「抑制性シナプス」がある。

<p>〈研究についてのお問い合わせ〉</p> <p>信川 創 (ノブカワ ソウ)</p> <p>千葉工業大学 情報科学部 情報工学科</p> <p>〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1</p> <p>TEL : 047-478-0538</p> <p>E-Mail: nobukawa@cs.it-chiba.ac.jp</p>	<p>〈広報関連についてのお問い合わせ〉</p> <p>大橋 慶子 (オオハシ ケイコ)</p> <p>千葉工業大学 入試広報課</p> <p>〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1</p> <p>TEL : 047-478-0222 FAX : 047-478-3344</p> <p>E-Mail: ohhashi.keiko@it-chiba.ac.jp</p>
---	--

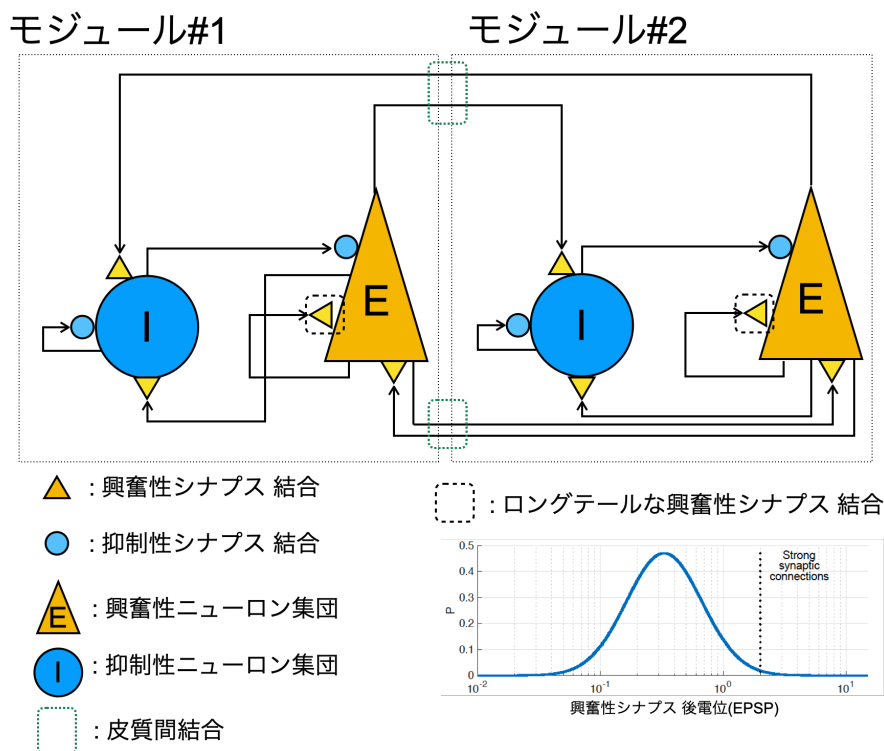


図 1 ロングテールな興奮性シナプス 結合と皮質間結合を持ったスパイキングニューラルネットワーク。

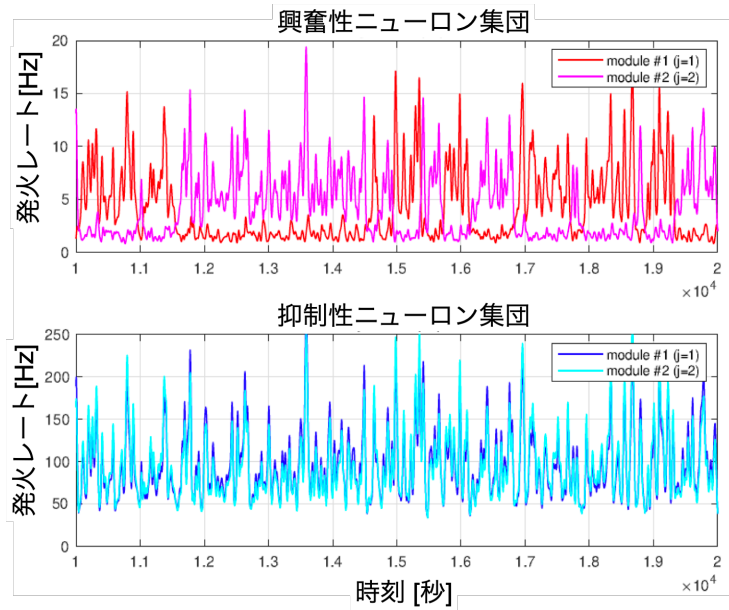


図 2 モジュール間オルタナティブ挙動の生起時の発火レートの時系列。どちらか一方のモジュールにおける興奮性ニューロン集団の発火レートが高くなり、それが間欠的にモジュール間で切り替わる様子が確認できる。

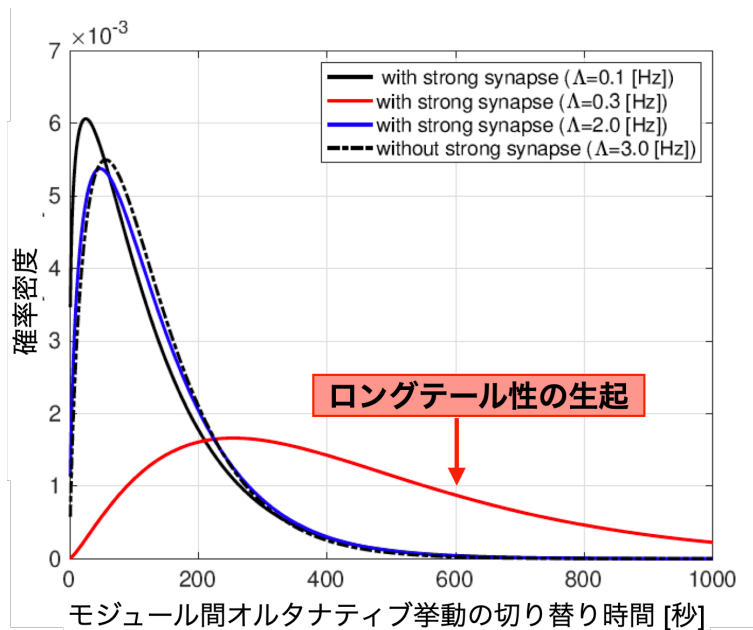


図 3 モジュール間オルタナティブ挙動の切り替え時間の確率密度分布。200[秒]以上の切り替え時間の顕著な増加により、ロングテールな確率分布が生起する様子が確認できる。