

In silico/in vitro 神経回路におけるリザーバ計算特性のモジュール構造依存性

Reservoir computing properties of in-silico/in-vitro modular neuronal networks

東北大通研¹, 東北大 AIMR²○住 拓磨¹, 山本 英明², 竹室 汰貴¹, 守谷 哲¹, 佐藤 茂雄¹, 平野 愛弓^{1,2}Tohoku Univ.¹, [○]T. Sumi¹, H. Yamamoto¹, T. Takemuro¹, S. Moriya¹, S. Sato¹, A. Hirano-Iwata¹

E-mail: takuma.sumi.s8@dc.tohoku.ac.jp

【背景・目的】脳のような複雑システムの作動原理を必要十分に理解するためには、*in vivo* 神経回路（脳）のトップダウン的計測に加えて、規定された神経回路を実細胞（*in vitro*）および数理モデル（*in silico*）に基づいて人工的に再構成し、その機能を調べるボトムアップ的解析が重要な役割を果たす。我々はこれまで脳のモジュール構造に焦点を当て、神経回路のモジュール性が自発活動の複雑性を高めることを *in vitro* および *in silico* の系で示した[1]。一方で、このような神経活動パターンの複雑性と情報処理システムとしての性能が、どのように結びついているかは未解明である。近年、機械学習の分野でリザーバ計算と呼ばれる固定した再帰的ニューラルネットワークを用いて計算を行う手法[2]が提唱された。この枠組みを用いれば上記の課題を解決できると考えられる。そこで我々は今回、*in vitro* および *in silico* 神経回路をリザーバ層とするモデルを構築し、ネットワークのモジュール性が分類タスクの正答率に及ぼす影響を評価したので、その結果を報告する。

【実験方法】積分発火型ニューロンモデル[3]を stochastic block model で配線することで、モジュール型神経回路を作成した。この回路に図 1 に示す 3 種類のパルス電流入力を与え、リザーバ/出力層間の結合荷重値をリッジ回帰により学習させたうえで、その分類性能を評価した。培養実験では細胞パターンニング技術によりモジュール型神経回路を作成した。ラット大脳皮質神経細胞に光活性型陽イオンチャンネル ChrimsonR と蛍光 Ca プローブ GCaMP6s を遺伝子導入し、パターン照明光を用いて光パルス刺激を与えることで、その分類性能を評価した。

【結果と考察】計算機シミュレーション上でモジュール間結合 P_{out} を [0.001, 0.25] の範囲で指定することで、モジュール性を有する回路を作成した。これらの回路の分類性能は図 2 のような分布を示し、中程度のモジュール性をもつ回路が高い正答率を維持した。モジュール間結合密度が小さいときは情報伝達されず分類性能が低下し、モジュール間結合密度が大きすぎるときはバースト発火により分類性能下がると考えられる。そしてモジュール間結合が中程度のところでは両方のバランスが良く高い分類性能が保たれると考えられる。一方で *in vivo* 神経回路も程よいモジュール性を持つことが知られ[4]、例えばマウス大脳皮質視覚野のモジュラリティ Q の報告値である $Q=0.55$ は、我々のモデルの $P_{out} \approx 3\%$ に当たる。モジュール構造は、生物の神経系において進化的に保存されているネットワーク構造であり、今回の解析により、計算論的意義をリザーバ計算の枠組みから示すことができた。本発表では、細胞パターンニング技術により作成したモジュール型培養神経回路(図 3)において、同様の枠組みで分類性能を評価し、モデルと比較を行った結果も合わせて報告する。

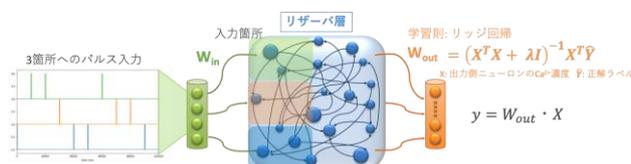


図 1: 神経回路をリザーバ層とするリザーバ計算モデル

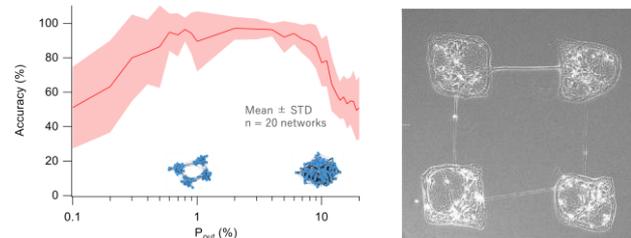


図 2: 各モジュール間結合における分類性能 図 3: モジュール型培養神経回路

[1] H. Yamamoto *et al.*, *Sci. Adv.* **4**, 11, eaau4914, 2018. [2] 田中剛平, 電子情報通信学会誌, **102**(2), 108-113, 2019. [3] S. Moriya *et al.*, *NOLTA, IEICE*, **11**(4), 590-600, 2020. [4] W-C. A. Lee *et al.*, *Nature*, **532**(7599), 370-374, 2016.