

高次元リザーバの実細胞再構成に向けた培養神経回路の伝搬指向性制御

Engineering signal propagation directionality in cultured neuronal networks for in vitro reconstitution of high-dimensional reservoirs

東北大通研¹, 東北大 AIMR², 山形大理工³ ○袁之雄¹, 山本 英明², 守谷 哲¹, 井出 克哉¹, 脇村 桂¹, 竹室 汰貴¹, 久保田 繁³, 佐藤 茂雄¹, 平野 愛弓²

Tohoku Univ. ^{*}, Yamagata Univ. ^{**} ○Z. Chen^{*}, H. Yamamoto^{*}, S. Moriya^{*}, K. Ide^{*}, K. Wakimura^{*}, T. Takemuro^{*}, S. Kubota^{**}, S. Sato^{*}, A. Hirano-Iwata^{*}

E-mail: yukio.en.r5@dc.tohoku.ac.jp

【背景・目的】ディープニューラルネットに代わる脳型ハードウェアの新しい計算方式として、リザーバコンピューティング (RC) が注目されている。RC は元来、ほ乳類脳の大脳皮質の情報処理様式を模した方式として考案されたが[1]、現行の RC の多くでは神経細胞のもつ複雑な入出力特性やネットワークにおける自発活動など、生体神経回路を特徴づける素子・回路の性質は考慮されていない[2]。脳は低い消費電力で高い情報処理能を示すことから、実神経細胞ネットワークのリザーバ特性を構成的に明らかにすることは、RC の更なる省電力化や学習効率向上に繋がると考えられる。しかしランダムに接続された培養神経回路のダイナミクスは全体同期が支配的であり、リザーバに適さない。そこで本研究では、高次元ダイナミクスを有する培養細胞回路を人工的に再構成することを目的として、計算機によるシミュレーションと培養神経回路による実験の両面から、階層的モジュール構造ならびに活動伝搬指向性が自発活動パターンの複雑性に与える影響を調べた。

【実験方法】100 μm 四方の正方形モジュール 16 個を階層的に配置し、モジュール間を 10 μm 幅の直線で接続した階層型モジュールネットワークを考えた。ここで、指向性結合導入を目的として、一部のモジュール間に間隙を設けて軸索の成長方向を制御したパターンを考案した(図 1(a))。マイクロプリンティング法[3]により足場タンパク質をパターンニングした基板に、胎生 18 日目ラット大脳皮質から摘出した神経細胞を播種し 10 日間培養した(図 1(b))。培養神経回路の自発活動は蛍光 Ca イメージング法を用いて計測した。神経ダイナミクスの複雑性は、functional complexity[4,5]を用いて評価した。

【結果と考察】積分発火ニューロンモデル[5]を用いたシミュレーションにより、階層的モジュール構造の一部のモジュール間結合に指向性を持たせると、幅広いモジュール間結合密度 k_0 で複雑性の高いダイナミクスが発現することが明らかになった(図 1(c))。そこで、このネットワーク構造を実細胞系で実現することを試みた。作製した培養神経回路の自発発火パターンを図 2 に示す。ネットワーク全体が同期して発火するときは左側のモジュール集団 (Cell #1-25, #60-82) から右側のモジュール集団 (Cell #26-59) へ活動が伝搬していることがわかった。伝搬遅延時間は、約 0.1 s であり、複数回出現した全体同期の間で保存されていた。また、右側のモジュールのみが発火する部分同期も複数回見られた。

このように、指向性パターンニングを用いることで、神経活動の伝搬方向が人工的に制御できた。この結果は、分散培養系においてリザーバで求められる高次元ダイナミクスを発現する神経細胞ネットワークを再構成できることを示唆している。

本研究は、科研費・研究基盤(B)ならびに JST-CREST の助成を受けて実施された。

[1] Maass et al., Neural Comput. 14, 2531 (2002). [2] Torrejon et al., Nature 547, 428 (2017). [3] Yamamoto et al., Appl. Phys. Lett. 109, 043703 (2016). [4] Zamora-López et al., Sci Rep. 6, 38424 (2016). [5] Yamamoto et al., Sci. Adv. 4, eaau4914 (2018).

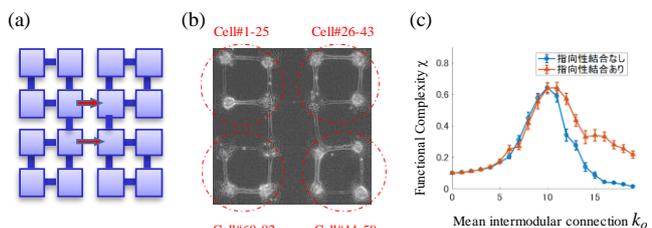


図 1: (a)パターン形状の模式図, (b)培養 10 日目の神経細胞回路, (c)指向性の有無が発火パターンの複雑性に及ぼす影響 (シミュレーション)

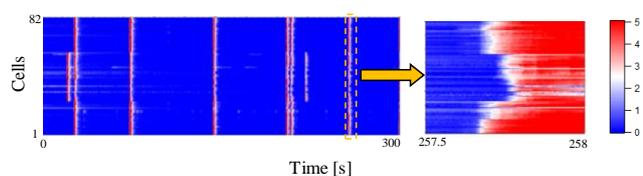


図 2: 各細胞の規格化蛍光輝度