

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月4日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00386

研究課題名(和文) 閾値下共鳴を示す神経細胞から成るネットワークのダイナミクス

研究課題名(英文) Dynamics in Cortical Network of Resonator neurons

研究代表者

姜 時友 (Kang, Siu)

山形大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40415138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年、電気生理実験により、ある種の神経細胞が発火の閾値下の電位変動において、特定の周波数に強く応答する共鳴現象を示すことが明らかになった。閾値下共鳴現象に対する単一細胞としての仕組みの理解が進められているものの、この共鳴素子が複数集まり、回路網を構成した際の振る舞いについては明らかになっていない。特に、記憶や学習などと関連したシナプス可塑性による回路形成に果たす役割はわかっていない。本研究では、閾値下共鳴現象を示す神経細胞からなる回路網が、周期背景入力とノイズの下で、外部からの刺激をどのように読み取り、回路構造へと反映するのかを、計算機シミュレーションによって調べることが目的としている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

閾値下共鳴現象を示す神経細胞から成る回路網が、周期背景入力とノイズの下で、シナプス可塑性を通じた学習を行う場合に、外部刺激に対する学習が周波数選択的に行われることが明らかになった。言い換えると、受け手側の回路が受ける周期入力の周波数に応じて、外部刺激に対する学習の仕方が異なるということが計算機シミュレーションによって示された。また、このような周波数に依存した学習の違いは、周期入力とともに与えられるノイズの強度が適度な場合にのみ生じることが明らかになった。この研究により、注意関連情報処理などといった高次脳機能に対する、神経回路レベルからの理解につながることを期待される。

研究成果の概要(英文)：Recent electrophysiological recording revealed that some types of neuron showed relatively strong response for specific frequency under their subthreshold level. Single neuronal property of such the subthreshold resonance was well examined, however, network behavior of the resonator is unclear. Particularly, its roll in circuit formation through the synaptic plasticity which provides higher order cortical function such as learning and memory is still unknown. In the present study, it is computationally examined how the resonator network stores the information of external stimuli and modifies network connectivity under the oscillatory background and noise.

研究分野：計算神経科学

キーワード：神経回路シミュレーション 脳型情報処理 記憶と学習 閾値下共鳴 スパイクタイミング依存可塑性 ニューラルネットワーク

1. 研究開始当初の背景

本研究は、以下の4つの神経現象をその由来としている。

- ・周期的背景活動
- ・神経ゆらぎ
- ・スパイクタイミング依存可塑性 (Spike-timing-dependent plasticity, STDP)
- ・単一細胞ダイナミクスとしての閾値下共鳴現象

周期的背景活動: ヒト脳波計測を始め、脳は、周期活動を示すことが古くから知られており、内的状態に対応して周波数成分が変調することなどが明らかになっている。例えば、視覚的注意と関連してはガンマ波が、ノンレム/レム睡眠時にはそれぞれデルタ/シータ波が顕著に出現することなどが知られている。

神経ゆらぎ: また、脳には絶えずゆらぎが生じており、外部刺激由来のものや、回路由来のものだけでなく、神経細胞レベルでも観測されている。このようなゆらぎが、神経情報処理を阻害するものではなく、むしろ積極的に情報処理に関与していることが明らかになっている。例えば、ノイズ下での発火タイミングの精密な制御 (Mainen & Sejnowski 1996 *Science*) や、興奮・抑制拮抗下での応答性の変調などが報告されている (Chance et al. 2000 *J Neurosci*, Shu et al. 2003 *Nature*)。

スパイクタイミング依存可塑性: 神経回路結合を変化させるシナプス可塑性は、記憶や学習の実体として古くから知られており、近年では、神経細胞の発火のタイミングに依存するスパイクタイミング依存可塑性 (Spike-timing-dependent plasticity, STDP) などが明らかになっている (Bi & Poo 1998 *J Neurosci*)。この可塑性ルールは、タイミングの情報を含むことから、学習過程において、時間情報と空間情報をつなぐ役割が期待されており、加法的STDPなどは、シナプス競合という特性を示すことなどが計算論的に明らかにされている (Song et al. 2000 *Nat Neurosci*)。

単一細胞ダイナミクスとしての閾値した共鳴現象: さらに、近年の電気生理実験によって、皮質を始めとしたある種の神経細胞が、その閾値下において共鳴現象を示すことが明らかになっている (Erchova et al. 2004 *J Physiol*, Ulrich 2014 *Eur J Neurosci*)。しかしながら、その計算論的意義に関しては、単一細胞レベルのものが主に調べられてはいるが、再帰結合回路内における役割については明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では、閾値下共鳴現象を示す神経細胞から成る回路網におけるダイナミクスを計算論的に明らかにすることを目的とした。特に、周期背景入力とノイズ下において、周期入力とノイズ強度が変化した際に、共鳴素子から成る回路のSTDP学習がどのような影響を受けるのかを調べた。

3. 研究の方法

閾値下共鳴素子としては、複雑なイオンチャネルダイナミクスを持つ Acker らのモデルを用いた (Acker et al. 2001 *J Comput Neurosci*)。まず、単一細胞としての周期入力に対する発火特性を調べ、閾値下応答が最も顕著な40Hzおよび50Hzに注目し、次にこのモデル100個によって再帰結合回路網を構築、周期背景入力とノイズの下で、細胞間結合がスパイクタイミング依存可塑性を通じて学習を行う際の振る舞いを調べた。外部入力としては、周期背景入力の位相タイミングを様々に変動させたものを用いた。

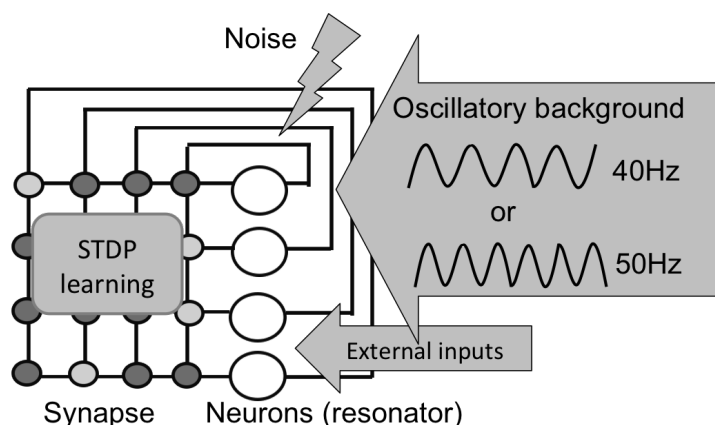


Figure 1

また、抑制回路の役割を見るため、興奮性細胞と同数の抑制細胞群を相互結合させた際の影響を調べた (Fig.1)。ノイズの強弱に応じた、STDP学習の周波数選択性を調べた (Fig.2)。

Attentional modulation of visual system

🍎 : Target

🌲 : Distractor (noise)

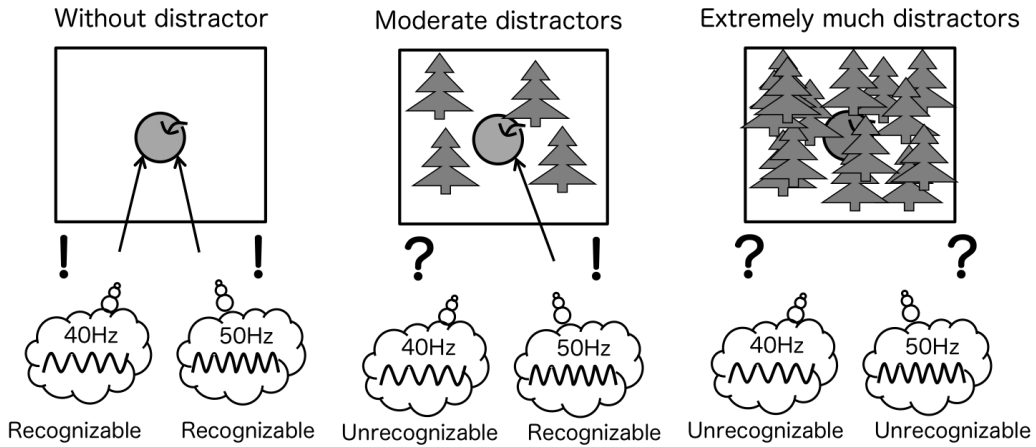


Figure 2

4. 研究成果

回路網モデルが、外部刺激を反映するような非一様な回路構造を、周波数選択的に獲得することを明らかにした (Fig.3 中)。そのような周波数選択性は、ノイズが全く無い場合や、過度に強いノイズの下では消失した (Fig.3 左右, Table.1)。言い換えると、ノイズ強度に対して自動的に調律されるということを示した (Fig.4)。さらに、最適ノイズは抑制回路によって微調整されることが明らかになった。これらにより、閾値下共鳴素子から成る回路網においては、周期背景入力とノイズの下で、入力の微細な時間構造を周波数選択的に学習できることが示された。これらの知見は、注意関連視覚情報処理などのように、周波数変調を伴う皮質局所回路機能に対する理解への貢献が期待される。(Fig.2)

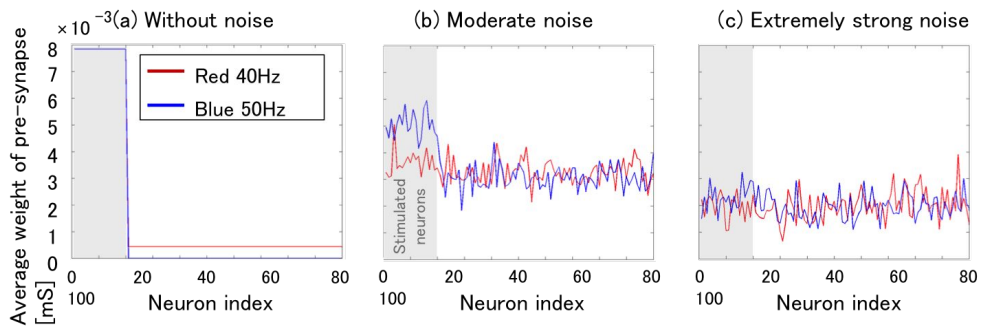


Figure 3

Background frequency	Without noise	Moderate noise	Extremely strong noise
40 Hz	Non-uniform	Uniform	Uniform
50 Hz	Non-uniform	Non-uniform	Uniform

} Frequency selectivity

Table 1

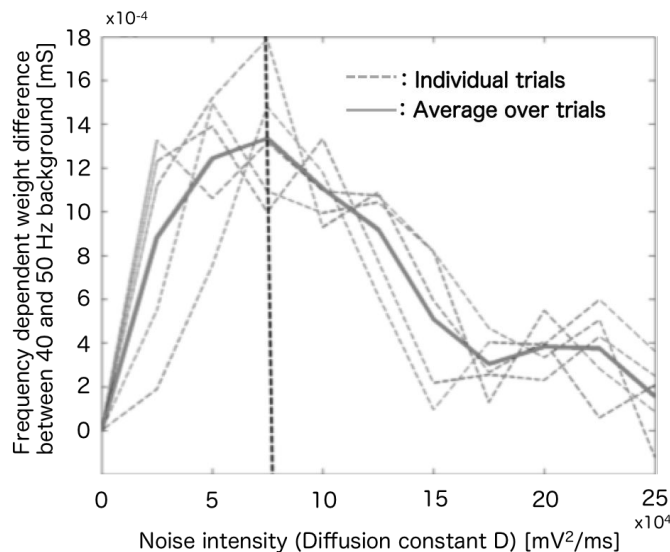


Figure 4

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Taishi Matsumura, Tetsuya Yuasa, Siu Kang^{CA} “Cortical learning through the spike-timing-dependent plasticity modulated by intrinsic membrane potential fluctuation”, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, 査読あり, 2019 Vol. 6(1) pp.32-42, <https://doi.org/10.15748/jasse.6.32>

〔学会発表〕(計 3 件)

Taishi Matsumura, Tetsuya Yuasa, Siu Kang^{CA} “Cortical learning through the spike-timing-dependent plasticity modulated by the intrinsic membrane potential fluctuation”, International Conference on Simulation Technology (JSST2018) pp.1-4 2018

Taishi Matsumura, Tetsuya Yuasa, Siu Kang^{CA} “Inhibition-mediated organization of cortical circuit through the spike-timing-dependent plasticity”, Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA) 2017 pp.1-4, 2017 年

Taishi Matsumura, Tatsuo Kitajima, Tetsuya Yuasa, Siu Kang^{CA} “Synaptic learning of the resonator network interacting with oscillatory background and noise”, The 9th Eurosim Congress on Modelling and Simulation, 2016 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年 :

国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。