

M-22

ハードウェアランダム結合ニューラルネットワークを用いた精神疾患メカニズムに対する一検討 —複雑性および位相同期性を用いた解析—

A Study on Mental Disorder Mechanisms Using Hardware Random Neural Networks Analysis of Complexity and Phase Synchronization Metrics

○浅井颯音¹, 山口拓人², 佐伯勝敏²*Hayato Asai¹, Takuto Yamaguchi², Katsutoshi Sacki²

Abstract: Although an imbalance in excitatory/inhibitory (E/I) synaptic activity is implicated in mental disorders such as autism spectrum disorder (ASD), its impact on neural circuit function remains unclear.

In this paper, we employed a hardware random neural network to examine how the E/I synaptic balance affects circuit dynamics, focusing on neural complexity and phase synchrony. As a result, the findings suggest a possible association with the E/I synaptic imbalance and reduced synchrony reported in ASD. These findings may deepen our understanding of information processing and stability in neural circuits and could contribute to the investigation of mental disorder mechanisms.

1. まえがき

近年、自閉症スペクトラム障害 (ASD) をはじめとする精神疾患に関する研究が進展し、特に脳内における興奮性と抑制性シナプス (E/I) バランスの乱れが注目されている。ASD では抑制性シナプス機能の低下や興奮性伝達の過剰が報告されており、感覚過敏や社会性障害などの臨床症状との関連が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、これら研究はいずれも生理学的研究や数理モデルを用いた研究が多く電子回路を用いた研究はほとんどない。

今回、ハードウェアランダム結合ニューラルネットワークを用いて E/I バランスが回路ダイナミクスに与える影響を捉えるためにマルチスケールエントロピー (MSE)⁽³⁾を用いた複雑性と位相同期解析(ITPC)⁽⁴⁾を用いた位相同期性について検討を行った。

2. 本論

Fig. 1に先行研究⁽⁵⁾で用いたハードウェアランダム結合ニューラルネットワークを E/I 比が 1:10 まで作成できるようにシナプスモデルを新たに 24 個追加し、ネットワーク内の E/I 比が 1:1 となるようにしたハードウェアランダム結合ニューラルネットワークを示す。図中の数字は P-HCNM の番号を示す。さらに、E/I 比を 1:2, …1:10, 2:1, …10:1 に変更してネットワークを構築した。

Fig. 2に Fig. 1で構成したネットワーク内の E/I 比を興奮性シナプスモデルのみ増加させて変化させた時と抑制性シナプスモデルのみ増加させて変化させた時の MSE の結果を示す。同図は、横軸に E/I 比、縦軸に MSE

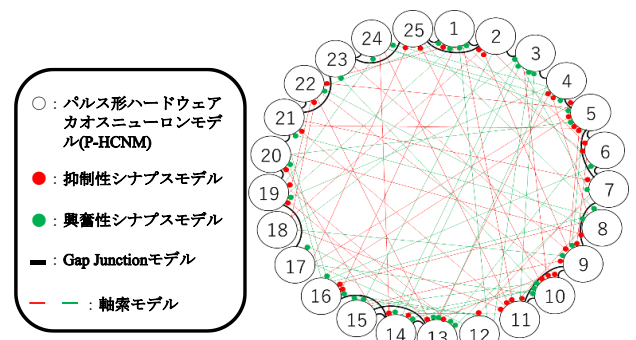


Figure 1. A hardware random neural network with E/I 1:1

を示している。この縦軸の MSE は先行研究⁽⁵⁾で算出した MSE と同条件、同方法で算出した。各比率における縦の実線は誤差範囲を示しており、赤の実線の誤差範囲は約 9.5%、黒の実線の誤差範囲は約 15%である。同図は、E/I 比に対して興奮性シナプスモデル数が増加すると MSE の値が増加し、抑制性シナプスモデル数が増加すると MSE の値が収束する傾向を示している。この MSE は複雑性を表しており、本研究の MSE の正規化条件下では、値が小さいほど複雑性が高い。したがって、興奮性シナプスモデルを増加させると複雑性は減少することを示している。

Fig. 3に E/I 比を興奮性シナプスモデルのみ増加させて変化させた時と抑制性シナプスモデルのみ増加させて変化させた時の ITPC の結果を示す。図中、横軸に E/I 比、縦軸に ITPC を示している。この縦軸の ITPC は各ニューロンが自励振動ないようにバイアス値を設定した後、ニューロン 18 番に周期 40 μ s, Duty 比 25% のパルス波を外部定常刺激として入力する。次に、各

1: 日大理工・院 (前)・電子, 2: 日大理工・教員・電子

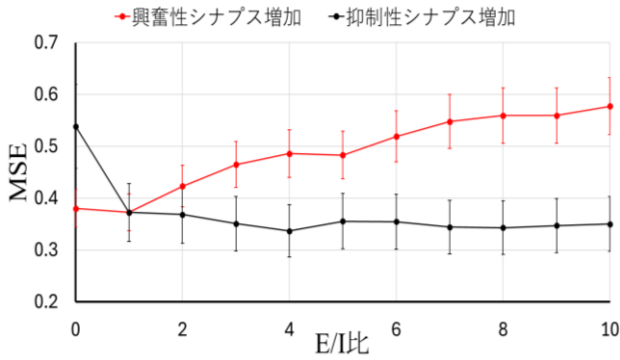


Figure 2. Characteristics of E/I synaptic model ratios vs. MSE

E/I 比中のネットワーク内のすべての P-HCNM について発火波形を用いて ITPC を算出する。最後に、25 個の P-HCNM の ITPC の値を平均を用いて一つの値にしている。ITPC は位相一致度を表し、1 で完全同期、0 で非同期を意味する。同図は E/I 比の興奮性シナプスモデルが増加すると ITPC の値が減少し、4:1 を境に値が収束することを示している。また、抑制性シナプスモデルが増加しても ITPC の値が 1:1 と 1:4 を除き変化しないことを示している。したがって、興奮性シナプスモデルを増加させると同期性は減少することを示している。

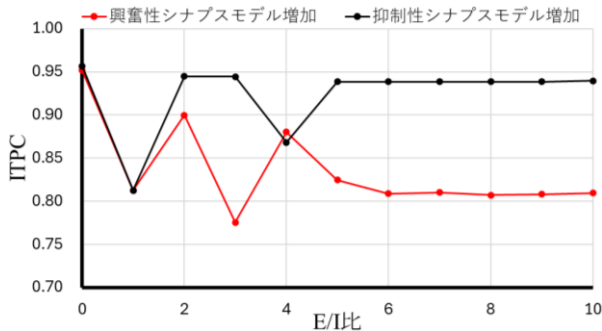


Figure 3. Characteristics of E/I synaptic model ratios vs. ITPC

Fig. 2、Fig. 3 の結果より、E/I 比が高くなる、すなわち興奮性シナプスが過剰となるにつれて、MSE は上昇し、ITPC は 1:1 で低下した後、4:1 を境に 0.8 で収束する傾向が見られた。さらに ITPC が 0.9 から 0.8 へ下がるということは、刺激に対する応答位相の同期性が低下し、位相ばらつきが増大したことを意味する。

Fig. 4 に位相分布をフォン・ミーゼス分布⁽⁶⁾で仮定した場合の理論上の計算結果の一部を示す。同図は、横軸に ITPC、縦軸に円周標準偏差を示している。同図より ITPC=0.9 に対応する位相の標準偏差は約 0.46rad(≈26°)、ITPC=0.8 では約 0.67rad(≈38°)であることを示している。これは、およそ 10~15°程度の位相ばらつき増大に相当する。位相ばらつきが数十度単位で

増大すると、神経活動の同期性は顕著に低下し、回路内外の入力に対する位相ロックが弱まる。その結果、神経集団の発火タイミングが揃わなくなり、情報伝送効率や同期連携の低下につながると考えられる。上記のような傾向は、ASD における E/I バランスの乱れや同期性低下⁽⁴⁾⁽⁷⁾と関連している可能性がある。

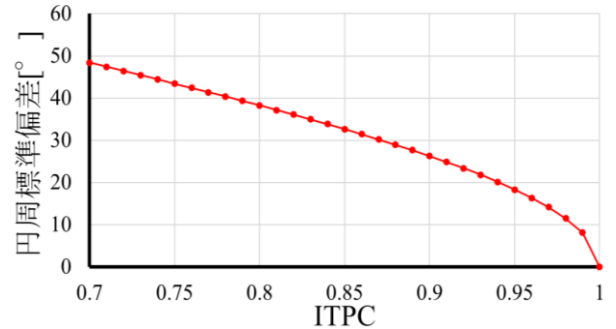


Figure 4. Characteristics of ITPC vs. circular standard deviation

3. まとめ

今回、ハードウェアランダム結合ニューラルネットワークを用いて E/I バランスが回路ダイナミクスに与える影響を捉えるために、複雑性と位相同期性について検討を行った。その結果、ASD で報告される E/I バランスの乱れや、それに伴う神経活動の同期性低下と関連している可能性があることを示している。したがって、本研究の知見は、神経回路における情報処理能力と安定性の理解を進める一助となり、精神疾患メカニズムの検討に役立つ可能性がある。

今後は、神経活動の時間的・周波数的スケール依存性を明らかにする解析を進める予定である。

4. 参考文献

- (1) S. B. Nelson and V. Valakh : “Excitatory/inhibitory balance and circuit homeostasis in autism spectrum disorders”, *Neuron*, 87(4), pp.684-698 (2015)
- (2) Sohal, V. S., & Rubenstein, J. L. : “Excitation-inhibition balance as a framework for investigating mechanisms in neuropsychiatric disorders”, *Molecular Psychiatry*, 24(9), pp.1248-1257. (2019)
- (3) M. Costa, A. L. Goldberger, and C.-K. Peng : “Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series”, *Phys. Rev. Lett.*, 89(6), 068102 (2002)
- (4) Nobukawa, S., et al. : “Effect of steady-state response versus excitatory/inhibitory balance on spiking synchronization in neural networks with log-normal synaptic weight distribution”, *Cognitive Neurodynamics*, Volume 16, pp.871-885. (2022)
- (5) 浅井 颯音・飯村 太輝斗・山口 拓人・佐伯 勝敏 : 「ハードウェアランダム結合ニューラルネットワークの E/I 比増減による神経活動の複雑性に対する一検討」, 日本大学理工学部, 学術講演会予稿集, M-13, pp.767-768 (2024)
- (6) Berens, P. : “CircStat: A MATLAB Toolbox for Circular Statistics”, *Journal of Statistical Software*, 31(10), 1-21. (2009)
- (7) Rubenstein, J. L., & Merzenich, M. M. : “Model of autism: increased excitation/inhibition ratio in key neural systems”, *Neuron*, 28(1), pp.122-134. (2003)