

シナプス前細胞多接続時動作可能な TSTDTP モデルに対する一検討

A Study on a TSTDTP Model Capable of Functioning in Multiconnected Presynaptic Cells

○高山詔宇¹, 上田萌², 周藤丈瑠², 山口拓人³, 佐伯勝敏³*Shouu Takayama¹, Moe Ueda², Takeru Shuto², Takuto Yamaguchi³, Katsutoshi Sacki³

Abstract: In neural learning, a TSTDTP learning mechanism has been reported where connection strengths change based on firing frequency. Previous TSTDTP circuits only functioned under conditions where the firing frequencies of PRE and POST neurons were equal. However, physiologically, it is known that neuronal connections can generate a single POST firing from multiple PRE firings. Therefore, this study constructed a TSTDTP circuit operating with different firing frequencies. As a result, it is shown that we construct TSTDTP characteristics that operate based solely on the PRE frequency, regardless of whether the process is strengthening or weakening.

1. まえがき

脳を構成するニューロンでは、細胞膜電位が閾値電圧を超えることで信号が軸索を通りシナプスを介して他のニューロンの樹状突起へと信号を送り、シナプスの活動パターンによって情報伝達がされる^[1]。記憶や学習は2つの細胞体間のシナプス強度によって示され、シナプス前細胞(PRE)とシナプス後細胞(POST)の発火時間差と発火順序よりシナプス結合強度が変化するSTDP(Spike-Timing-Dependent synaptic Plasticity)学習則が報告されている^[2]。さらに、発火周波数によりシナプス結合強度が変化するTSTDTP(Triplet-STDP)学習則も報告されている^[3]。また、ニューロンは多数のシナプス結合を通じて、多くのニューロンから信号を受け取る空間的荷重の特性を持つことが知られている^[4]。しかし、先行研究でのTSTDTP回路では増強領域と減弱領域で別々の周波数を参照していたため、PRE発火頻度とPOST発火頻度が等しい場合でしか正常に動作しなかった。本論文では、PRE発火周波数とPOST発火周波数が異なる場合でも増強部と減弱部で同様にTSTDTP特性を示すSTDPモデルの検討を行った。

2. 本論

非対称型STDP回路ではPRE→POSTの発火順序のとき増強し、POST→PREの発火順序のときに減弱する。TSTDTP回路では発火周波数が高いと結合荷重値の変化率が増加し、発火周波数が低いと変化率が低下する。

Fig. 1に今回構築した非対称型TSTDTP回路の周波数参照部を示す。既存のTSTDTP回路^[5]ではバイアス電圧によりM3, M24から電流がコンデンサC1, C2に流れ徐々に電圧がチャージされていき、PRE発火によりM4, M25が動作することで電荷が引き抜かれる。こうして

PREの発火頻度によって変動するコンデンサの電圧を差動増幅回路に入力し一定のバイアス電圧と比較することで、周波数に応じた補正電流を発生させ、TSTDTP特性を示していた。しかし、既存のTSTDTP回路では、①バイアスによりコンデンサに電荷がチャージされる。②PRE発火でコンデンサ電位が引き抜かれる。③後段のPOST発火によって差動増幅回路が動作する。③の時点で既に②でコンデンサ電位が引き抜かれているため、PRE周波数による動作はしなかった。

本回路では発火で電位が変動するコンデンサC1, C3に加えてコンデンサC2, C4を並列接続させ、無遅延PRE発火で引き抜き、微小時間遅延したPRE発火で並列コンデンサへ電位をコピーする仕組みとし、PRE周波数による電位を保持することで後段のPOST発火時もコンデンサが電位を保ち動作する構成とした。

Fig. 2に発火順序PRE→POST時の発火時間差0.5μsの場合のPRE発火、POST発火とC1とC2のコンデンサ電位を示す。C1の電荷はPRE発火で引き抜かれているが、C2が電荷を保持することでPOST発火時に差動増幅回路にPRE周波数に依存する電圧を印加するため、発火順序によらずTSTDTP特性を示すことを示唆している。

Fig. 3に今回作成した非対称型TSTDTP回路の時間窓特性を示す。図中、横軸は時間を、縦軸は結合荷重値を示す。PRE発火は初期発火を5μsとし、POST発火を初期発火2~8μsの範囲で0.05μsごとに变化させ以降設定周期で発火させ、PRE, POSTが近距離発火で5回動作した結合荷重値を示している。設定周期は20μs(50.00kHz), 40μs(25.00kHz), 60μs(16.67kHz)の3種類であり、今回作成した非対称型TSTDTP回路はPRE周波数のみを参照する回路であるためPRE周期を

1 : 日大理工・学部・電子 2 : 日大理工・院(前)・電子 3 : 日大理工・教員・電子

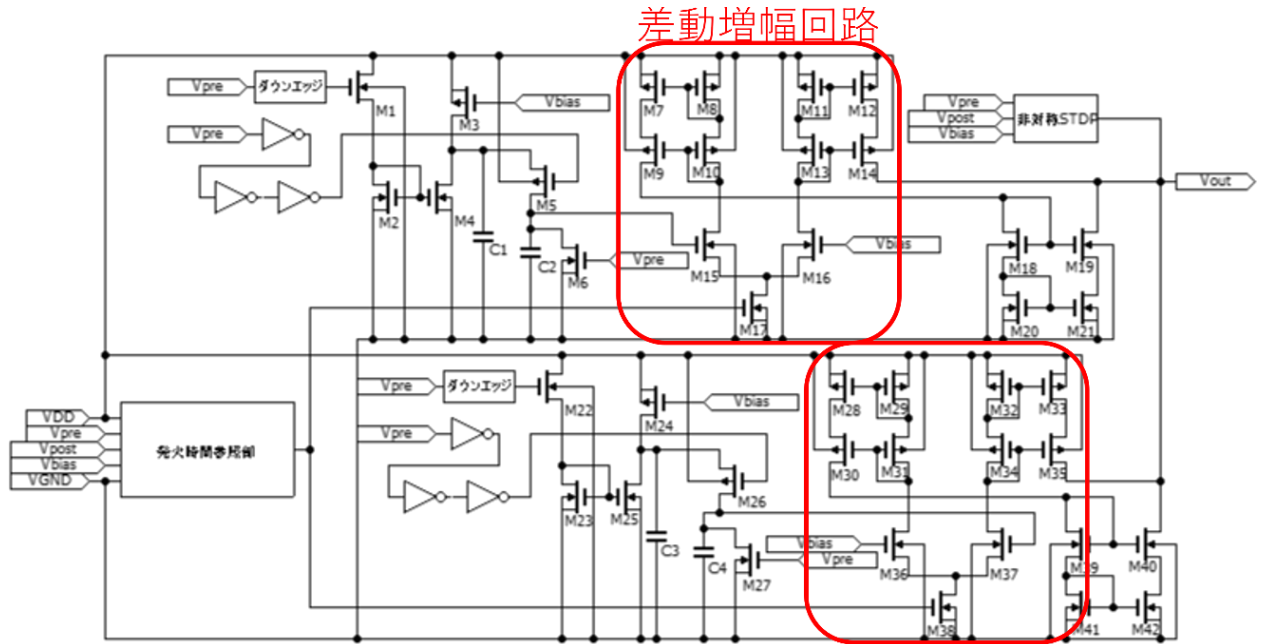


Figure 1. 非対称型 TSTDTP 周波数参照部回路図

20 μ s(青色), 40 μ s(橙色), 60 μ s(緑色), POST 周期は 20 μ s(実線), 40 μ s(破線), 60 μ s(点線)として表している. 同図の結果より, 本来関与しない POST 周波数によって出力が約 0.1V 変動しているが, 増強領域と減弱領域の全領域で PRE 周波数ごとに結合荷重値は分類されており, PRE 周波数に依存した TSTDTP 特性を示している.

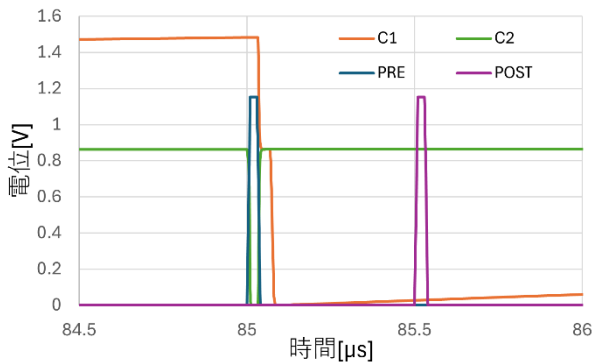


Figure 2. PRE, POST, C1, C2 電位

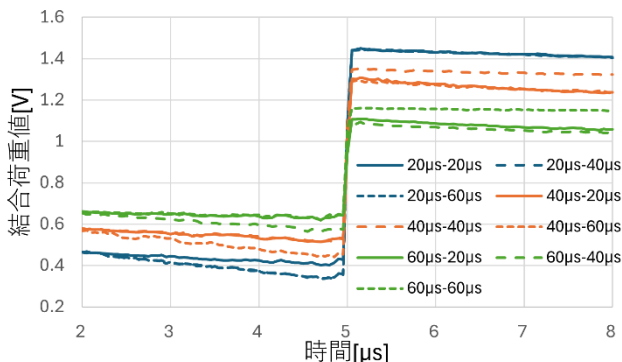


Figure 3. 時間窓特性

3. まとめ

今回, PRE 発火と POST 発火が異なる周波数で発火する場合でも動作する非対称型 TSTDTP 回路の検討を行った. その結果, 増強, 減弱の全領域で PRE 発火周波数に依存した TSTDTP 回路を実現できることを明らかにした.

今後は, POST 発火周波数の変化による出力波形のズレをより抑えていくと共に, 今回作成した非対称型 TSTDTP モデルを用いた学習法を検討していく予定である.

4. 参考文献

- [1] Mary B.Kennedy: “Synaptic Signaling in Learning and Memory”, National Institutes of Health,2016.
- [2] S.Song, K. Miller, and L. Abbott : “Competitive Hebbian learning through spike-timing-dependent synaptic plasticity”, Nature Neuroscience, Vol.3, No.9, pp919-926, 2000.
- [3] Guo-qiang Bi, Mu-ming Poo : “Synaptic Modifications in Cultured Hippocampal Neurons : Dependence on Spike Timing, Synaptic Strength, and Postsynaptic Cell Type” ,J.Neurosci, Vol.18, pp.10464-10472, 1998.
- [4] Sir Charles Scott Sherrington: “The Integrative Action of the Nervous System”, Yale University Press,1906.
- [5] 菊池優作: 「対称型 TSTDTP 学習則を用いた画像パターン記憶想起ハードウェアモデル」, 日本大学大学院理工学研究科修士論文, 2023