

1 パルス列入力を加えた場合の逆伝搬特性を有する
 樹状突起ハードウェアニューロンモデルの応答特性に対する検討
 A Study on Response Characteristics of Dendrite Hardware Neuron Model
 with Back Propagation about One Pulse Train Input

○姜波¹, 関根好文²

*Bo Jiang¹, Yoshifumi Sekine²

Abstract: It has been reported that back propagation action potential by the input to a dendrite perform an important role in the plasticity of the synapse. We pay attention to back propagation characteristics by the input to a dendrite to construct a hardware model using electronic circuits with the characteristics of biological neurons. In this paper, we consider the response characteristics of dendrite hardware neuron model with back propagation about one pulse train input. As a result, it is shown that this model is able to realize pulse-type hardware neuron model with characteristics of LTP, LTD.

1. まえがき

樹状突起への入力による樹状突起を逆伝搬する活動電位はシナプスの可塑性に重要な役割を果たしている [1], [2]. 私は、局所情報処理の立場から、その役割の一端を明らかにすることを目的に研究を行っている。

本論文では、樹状突起の逆伝搬特性を有するパルス形ハードウェアニューロンモデルを用い、シナプス前ニューロンからの 1 パルス列入力周期を変化させた場合の樹状突起モデルの応答特性について検討する。

2. 本論

図 1 に、ニューロンモデルの概略図を示す。同図は N 番目の細胞体モデル C_N に J 本の樹状突起モデルを接続し、1 本の樹状突起モデルを I セクションで構成した。樹状突起モデルのそれぞれのセクションには他のニューロンからのシナプスが接続され、 C_N に近い方から順に 1 から I とした。今、j 本目の樹状突起の i 番目のセクションを D_{Nji} とすると、その入力になる細胞体モデルは C_{inji} と表せる。今、 C_{inji} の出力をシナプス前ニューロンからの入力として、その入力により、 C_N が先発火し、 D_{Nji} を逆伝搬することになる。

図 2 に図 1 中の Synapse model ▲ の回路図を示す。図中、 C_{inji} の出力 V_{inji} を M_{s1ji} のゲートに接続し、図 1 中の Cell body model [2] C_{inji} が外部入力なしの自励振動や外部入力に対し応答する他励振動に設定できる。今回、他励振動を用いた。また、 M_{aji} , M_{cji} のゲート端子 EPSP, BPAP にそれぞれ C_{inji} の出力 V_{inji} , 樹状突起を逆伝搬する活動電位 V_{Nji} を接続し、 M_{bji} , M_{dji} のゲート端子 EPSP τ , BPAP τ にそれぞれ興奮性シナプス後電位に相当する V_{s4ji} , 樹状突起を逆伝搬する活動電位 V_{Nji} 通過後の過分極状態を想定した V_{Nji} を接続した。 V_{inji} と V_{Nji} の生成

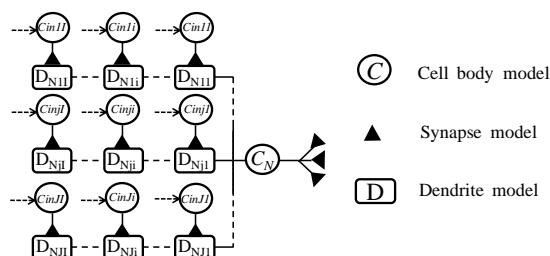


Fig. 1. General view of neuron model.

タイミングにより、シナプス伝達効率に相当する C_{sji} の両端電圧 V_{sji} が変化することになる。

図 3 に図 1 中の Cell body model C_N と j 本目の Dendrite model D_{Nji} で構成した回路図を示す。同図は、Cell body model としては図 1 中の C_{inji} と同じな回路構成を用いた。Dendrite model は、 $D_{Nj1} \sim D_{NjI}$ を縦続接続したもので、図 2 の V_{sji} を M_{N2ji} のゲートに接続した。

次に、図 2 の C_{inji} の出力 V_{inji} のパルス周期で決まった V_{inji} と i 番目のセクションの出力電圧 V_{Nji} のタイミングについて考える。 C_{inji} からの入力を受けたシナプスはシナプス遅延 $C_{s4ji}R_{s4ji}$ 後、 D_{Nji} に入力され、 C_N が発火し、 D_{Nji} を逆伝搬する。 V_{inji} の発生時刻を t_{inji} , V_{inji} の時定数である電圧 V_{s4ji} の遅延時間を t_{Eji} , t_{inji} 時刻に発生する V_{inji} による V_{Nji} の発生時刻を t_{Nji} , V_{Nji} の時定数である電圧 V_{Nji} の遅延時間を t_{Bji} とした場合、 V_{inji} に対し、 V_{Nji} の遅延時間 $t_{delay} = t_{Nji} - t_{inji}$ になり、次の V_{inji} の発生時刻を t_{inji+1} とした場合、 V_{inji} のパルス周期 $T = t_{inji+1} - t_{inji}$ になり、 t_{delay}

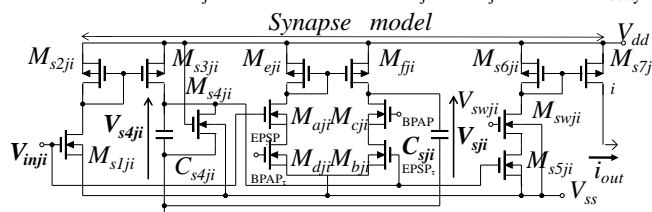


Fig. 2. Circuit diagram of synaptic model.

1 : 日大理工・院 (前) ・電子 2 : 日大理工・教員・子情

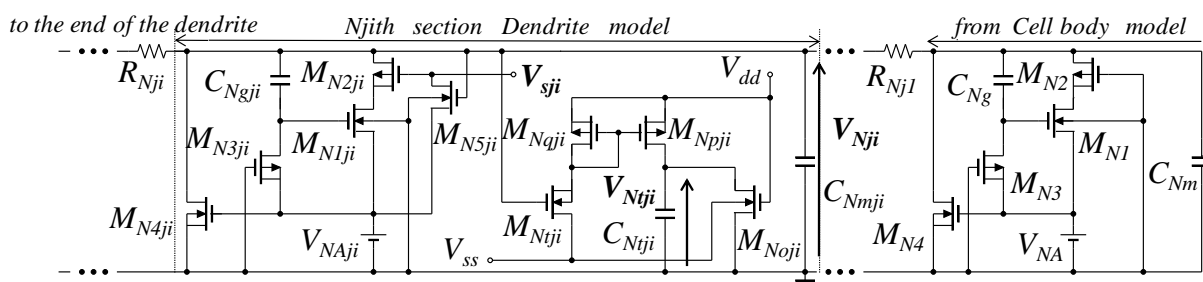


Fig. 3. Circuit diagram of cell body and dendrite model.

$\geq t_{Eji}$ の関係の上で① $T \geq t_{delay} + t_{Bji}$ の条件で、 V_{Nji} のパルスが発生する場合、MOSFET $M_{aji} \sim M_{fji}$ で構成する回路が動作しなく、 M_{N5ji} が動作し C_{sji} に電荷を緩やかに充電することで D_{Nji} の M_{N2ji} のゲート電圧 V_{sji} が緩やかに増加し振幅 V_{Nji} が緩やかに減衰することになる。② $t_{delay} < T < t_{Bji} + t_{delay}$ の条件で、 V_{Nji} のパルスが発生する場合、 C_{sji} に $M_{aji} \sim M_{fji}$ で構成する回路により電荷を激しく充電することで、 V_{sji} が激しく増加し振幅 V_{Nji} が激しく減衰することになる。③ $T < t_{delay}$ の条件で、 V_{Nji} のパルスが発生する場合、 C_{sji} に $M_{aji} \sim M_{fji}$ で構成する回路により電荷を逆充電することで、 V_{sji} が減少し振幅 V_{Nji} が増加することになる。

今回、j 本目の樹状突起モデル D_{Nj2} に入力し検討した。

図 4 に入力周波数は 450us, 198us, 40us, の時の D_{Nj2} の伝搬波形を示す。同図の a に条件①を満足した場合の伝搬波形を示す。図 a より、振幅 V_{Nj2} が緩やかに減衰することを示している。同図の b に条件②を満足した場合の伝搬波形を示す。図 b より、振幅 V_{Nj2} が図 a に比べ激しく減衰し、長期抑圧 LTD に相当することが誘発されることを示している。同図の c に条件③を満足した場合の伝搬波形を示す。図 c より、振幅 V_{Nj2} が図 a に比べ増加し、長期増強 LTP に相当することが誘発されることを示している。

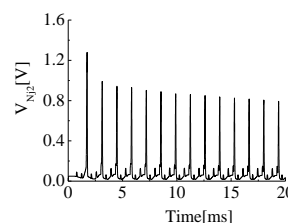
図 5 に条件②を満足した場合の Δt に対する D_{Nj2} の出力振幅特性を示す。図中、横軸に Δt ($\Delta t = t_{Nj2} - t_{inj2+1}$)、縦軸に条件①を満足した場合の D_{Nj2} の振幅 $V_{Nj2, 0}$ で正規化した値を示している。同図より、活動電位が $V_{Nj2} \rightarrow V_{inj2+1}$ の順で生成する場合には、振幅 V_{Nj2} が減衰し、長期抑圧 LTD に相当することが誘発されることを示している。また、 Δt が大きくなるにつれ V_{Nj2} の変化が小さくなることを示している。

図 6 に条件③を満足した場合の C_{inj2} からの入力周波数 f_{inj2} に対する樹状突起モデル D_{Nj2} の出力周波数 f_{Nj2} の特性を示す。同図より、 f_{inj2} が高くなるにつれ f_{Nj2} が小さくなることを示している。

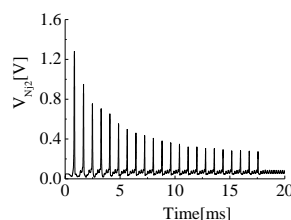
3. まとめ

今回、シナプス前ニューロンからの 1 パルス列入力周期を変化させた場合の樹状突起モデルの応答特性に

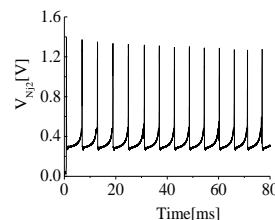
ついて検討した。その結果は、条件①を満足した場合の D_{Nj2} の出力振幅 V_{Nj2} に比べ、条件②を満足した場合の V_{Nj2} は減衰になり、LTD に相当することが誘発され、条件③を満足した場合の V_{Nj2} は増加になり、LTP に相当することが誘発されたことを示している。また、条件②を満足した場合の活動電位 V_{Nj2} と V_{inj2+1} の発生時間差 Δt が大きくなるにつれ V_{Nj2} の変化が小さくなったことを示している。更に、条件③を満足した場合には、 C_{inj2} からの入力周波数 f_{inj2} が高くなるにつれ D_{Nj2} の出力周波数 f_{Nj2} が小さくなったことを示している。



a. T=450[us].



b. T=198[us].



c. T=40[us].

Fig. 4. Propagation wave patterns of V_{Nj2} .

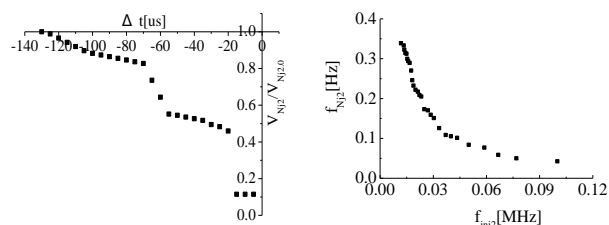


Fig.5. Output characteristics Fig.6. Frequency characteristics

参考文献

- (1) R. Yuste and D. W. Tank, "Dendritic integration in mammalian neurons, a century after cajal," Neuron, vol. 20, pp. 125-131, 1997.
- (2) G. Stuart · · : "Action potential initiation and backpropagation in neuron of the mammalian CNS," Trend Neurosci. , vol. 20, pp. 125-131, 1997.
- (3) 関根, 隅山 · · : 「エンハンスメント型 MOSFET による Λ 形ニューロンモデル」, 信学論(C)vol. J84-C, No. 10, pp. 988-994, 10-2001.