

集積化可能な能動的樹状突起モデルの構築に対する一検討  
 A Study on Construction of an Active Dendrite Model for VLSI Implementation

○丹羽春太<sup>1</sup>, 佐伯勝敏<sup>2</sup>, 佐々木芳樹<sup>2</sup>  
 \*Haruta Niwa<sup>1</sup>, Katutoshi Saeki<sup>2</sup>, Yoshiki Sasaki<sup>2</sup>

Abstract: The human brain is composed of a number of neurons. We focus on the dendrites, which has propagation characteristics of signal based on three physiological phenomena. In this paper, we propose an active dendrite model for VLSI implementation. As a result, it is clarified that we construct an active dendrite model using low capacitance value.

1. まえがき

人間の脳はいくつもの脳細胞によって構成されている。それらの複数の脳細胞は互いに電気信号を送受信しあうことで情報のやり取りを行っている[1]。この電気的特性をアナログ回路によって示すことで人間の脳を再現することにつながる。脳細胞は大きく分けて4つの部位で構成されている。信号を受信する樹状突起(Dendrite)、送信するシナプス(Synapse)、伝送線路である軸索(Axon)、および信号の処理を行う細胞体(Cell Body)である。この中の1つである樹状突起が見せる生理学的な電気信号は以下のような特徴が挙げられる。

- (1)伝達する電気信号を減衰させる。
- (2)伝達する電気信号を遅延させる。
- (3)樹状突起に刺激が加わったときに細胞体は樹状突起が発火するより先に発火する。

樹状突起は、これら3つの信号を受信するだけでは無く受信信号に影響を与える能動的な特性を持っている[2][3][4][5]。

本論では、標準的なアナログ CMOS プロセスのみで集積化可能な能動的樹状突起モデルを構築し、3種類の能動的受信特性について検討を行ったので報告する。

2. 本論

今回は、樹状突起の1つと細胞体部分の電気信号特性を示す回路の構築を行う。

Figure 1に細胞体モデルの回路図を示す。本モデルは NOMOS の M2, M3, M4, M6と PMOS の M1, M5, コンデンサの C1, C2と抵抗の R1, R2によって構成した。各素子はそれぞれ生体における膜容量に相当するキャパシタ C1, 漏れ抵抗部 M6, 動的バイアス部に相当する C2, 静的バイアス部 M3, バイアス電圧の変化を補助する M4, M5, Δ形負性抵抗素子に相当する M1, M2の周辺との結合を行う抵抗 Rout

及び Rin の7要素で構成している。同図において、V1に印加する電圧の違いにより、自発的な発振を行う自励振モデル、外部刺激を受けて発振を行う他励振モデルに使い分けることが可能である。樹状突起内の逆伝搬特性の再現には、他励振モデルを用いる。

Figure 2に Figure 1で示した細胞体モデルに刺激として Vin を加えた場合の Vout の出力特性の結果を示す。同図において、横軸に時間、縦軸に出力電圧を示す。同図は、刺激電圧が加わるとおよそ1μsの周期のパルスが連続して出力する。このことは、本モデルが逆伝搬に必要なパルスを生成可能であることを示している。

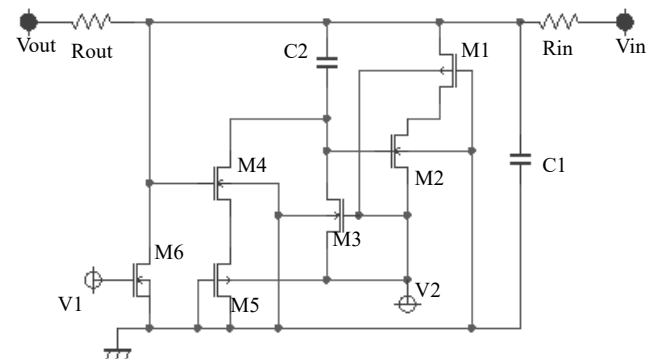


Figure 1. Cell body model

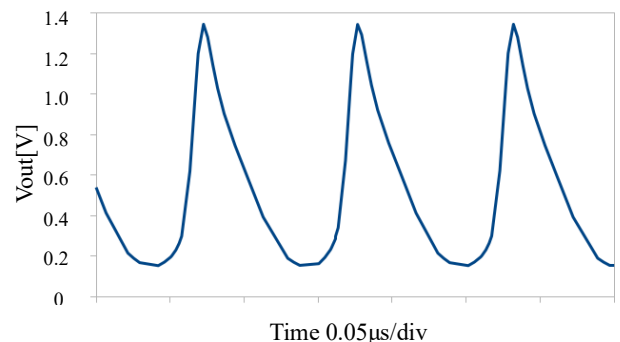


Figure 2. Output voltage of cell body model

Figure 3に今回提案する能動的樹状突起モデルの概略図を示す. 本モデルは細胞体と一本の樹状突起のモデルである. 直列に接続している樹状突起モデルの任意のセクションに刺激として電流が加わった時, 平行に接続した刺激伝搬路を經由して電流が細胞体モデルに流れ込む. 細胞体モデルに流れ込んだ電流によって細胞体モデルで発火し, その信号を起点として樹状突起モデルの Section n から Section 1まで順に信号が伝搬される. また, この伝搬の際に各セクションに設けた接続抵抗と容量によって信号の遅延と減衰が起きる. これらの特性より前述した樹状突起が見せる生理学的な電気信号の特徴を満たす回路の構成ができる. これらの構成により, 前述した3種類の能動的受信特性を実現する.

Figure 4に Figure 3で概要を示した樹状突起モデルを一例として4つの Sectionで構築した際に得られた各セクションでの出力結果を示す. 今回, Figure 3の樹状突起モデルの Section 1から刺激として振幅0.45V, 周期200 $\mu$ s, Duty比12.5%のパルス波を入力した. 同図は細胞体モデル, 樹状突起モデルの Section4, Section3, Section2, Section1という順に発火が起きていることを示している. また, 図中, 破線のとおり, 生じた電圧が生じた順番に応じて減少することを示している. さらに, 各 Section ごとに発火のタイミングは遅延していることを示している. 遅延の間隔は1つの Section ごとにおよそ0.0075 $\mu$ s ずつの遅延が起きている. 以上より, 今回提案した能動的樹状突起モデルを構築することで, 前述した3種類の能動的受信特性が再現可能であることを示している.

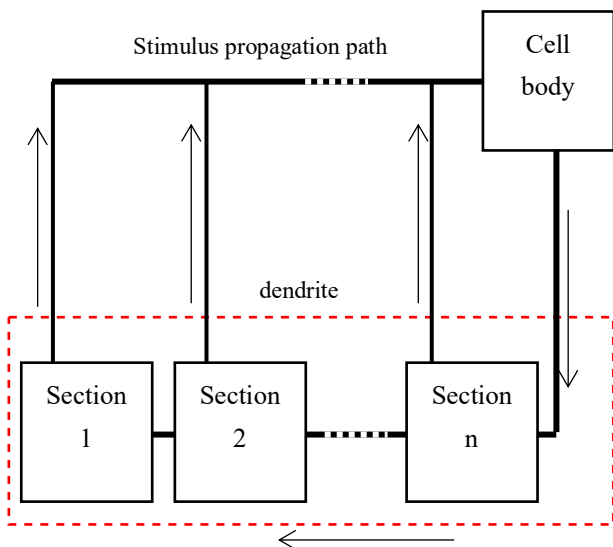


Figure 3. Dendrite model

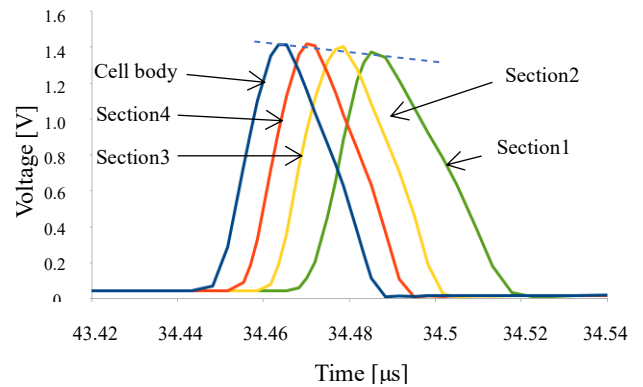


Figure 4. Output voltage of dendrite model

### 3. まとめ

今回は, 標準的なアナログ CMOS プロセスのみで集積化可能な能動的樹状突起モデルを構築し, 3種類の能動的受信特性について検討を行った. その結果, 減衰・遅延および逆伝搬特性を再現していることから, 本モデルを用いることで樹状突起モデルがもつ3種類の能動的受信特性を再現できることを明らかにした.

今後は, 今回提案した能動的樹状突起モデルのチップ化を行う. また, 樹状突起の複数のセクションに刺激が加わった場合の出力への影響を明らかにし, 刺激の加わったセクションの判別法を検討する.

### 5. 参考文献

- [1] 高森圭介, 「ここまで解明された最新の脳科学脳の仕組み」, Newton ムック, 株式会社ニュートンプレス, 2008年発行.
- [2] 薛宗陽, 染谷和孝, 関根好文, “逆伝搬特性を有する能動的樹状突起ハードウェアモデル” 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J86-C, No.11, pp.1160-1168, 2003年.
- [3] D.Johnston , J.C.Magee , C.M.Colbert , and B.R.Christie, “Active properties of neural dendrites.” Annu. Rev. Neurosci., vol.19 , pp.165-186, 1996.
- [4] G.J. Stuart and B. Sakamann, “Active propagation of somatic action potentials into neocortical pyramidal cell dendrites.” Nature, vol.367, pp.69-72, 1994.
- [5] N.Spruston, Y.Schiller, G.Stuart, and B.Sakamann, “Activity-dependent action potential invasion and calcium influx into hippocampal CA1 dendrites.” Science, vol.268, pp.297-300. 1995.