

樹状突起モデルの周波数特性に対する一検討 A Study on Frequency Response of Dendrite Models

○山田泰史¹, 近藤宏樹², 山口拓人³, 佐伯勝敏⁴, 佐々木芳樹⁴

*Hirofumi Yamada¹, Hiroki Kondoh², Takuto Yamaguchi³, Katsutoshi Saeki⁴, Yoshiki Sasaki⁴

Abstract: We focused on the frequency characteristics of biological dendrites, which are the components of brain cells, because apply the superior information processing of the brain to engineering.

In this paper, we propose dendrite models with frequency characteristics by using a frequency-voltage conversion circuit composed of a bandpass filter and a half-wave rectifier circuit. As a result, it is shown that output firing waveform with frequency characteristics by controlling the current source of the OTA.

1. まえがき

人の脳は、いくつもの脳細胞が電気信号を介して、情報を送受信することで機能している。高効率で、高度な処理を行う脳を模倣し、モデル化することは工学的応用につながると考える。

我々は、脳細胞を構成する要素である樹状突起の持つ周波数特性に着目した。樹状突起には、以下の周波数特性が確認されている^[1]。

- (1) 入力周波数が大きくなると出力は減衰する。
- (2) 減衰の程度は、入力側の細胞体側に近いほど大きくなり、次段の細胞体側へ行くほど小さくなる。

今回、能動的樹状突起の3つの生理学的特性^{[2][3]}を保持した上で、新たに周波数特性を有する樹状突起モデルの構築を行った。

2. 本論

周波数特性を実現するために、(a)周波数特性を有し、変換できる回路、(b)変換された周波数を発火波形に反映するための回路が必要であると考え、樹状突起モデルのブロック図について検討を行った。

Fig.1 に今回提案する周波数特性を有する樹状突起モデルのブロック図を示す。同図は、能動的樹状突起の3つの生理学的特性を有する樹状突起セクションと、各出力にて周波数を電圧に変換するバンドパスフィルタ+半波整流回路、周波数を参照した電圧を反映するOTA(Operational Trans conductance Amplifier)によって構成した。

Fig.2 に周波数—電圧変換回路の回路図を示す。同図はバンドパスフィルタと、半波整流回路で構成している。フィルタは、出力に周波数特性を持たせる基準として用いた。ハイパス側は入力信号のDC値を取り除くことを目的としているため、カットオフ周波数は一

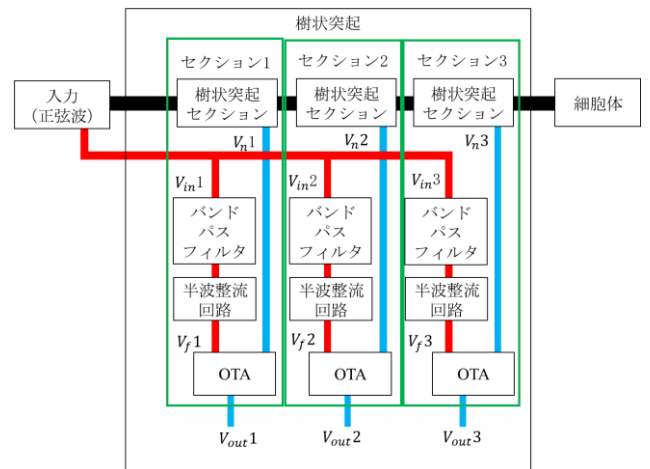


Figure 1. Block diagram of propose dendrite model considering frequency response

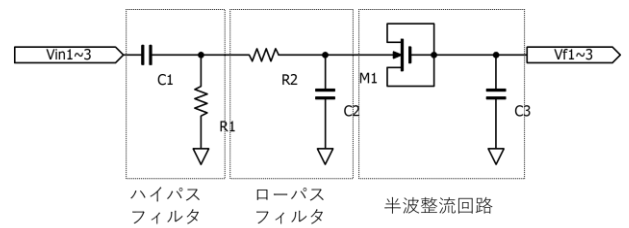


Figure 2. Frequency-to-voltage conversion circuit

律 10Hz で設定した。ローパス側は各出力の周波数特性を担うため、入力側に近いほどカットオフ周波数を小さく、次段の細胞体側へ行くほど大きく設計を行った。半波整流回路は、フィルタによって選別された信号を平滑化することで、周波数に応じて変化する電圧値を得るために用いた。パラメータは Fig.1 のセクション1にて、C1: 100nF, C2: 100pF, C3: 50fF, R1: 160kΩ, R2: 33kΩ, M1: 5.6 (LW比)。セクション2にて、C1: 100nF, C2: 100pF, C3: 50fF, R1: 160kΩ, R2: 16kΩ, M1: 5.6。セクション3にて、C1: 100nF, C2:

1: 日大理工・学部・電子 2: 日大理工・院(前)・電子 3: 日大理工・院(後)・電子 4: 日大理工・教員・電子

100pF, C3 : 50fF, R1 : 160kΩ, R2 : 33kΩ, M1 : 5.6に設定した.

Fig.3 に OTA の回路図を示す. 二つの入力電圧の差分を電流として出力する OTA を, アンプとして利用した. 発火波形 $V_n1\sim3$ を入力した V+と, 定電圧を入力した V-の差動出力を, 動作電流源 M9 へ $V_f1\sim3$ より入力周波数に依存した電圧を入力することで, 出力される発火波形の大きさを入力周波数に依存させた.

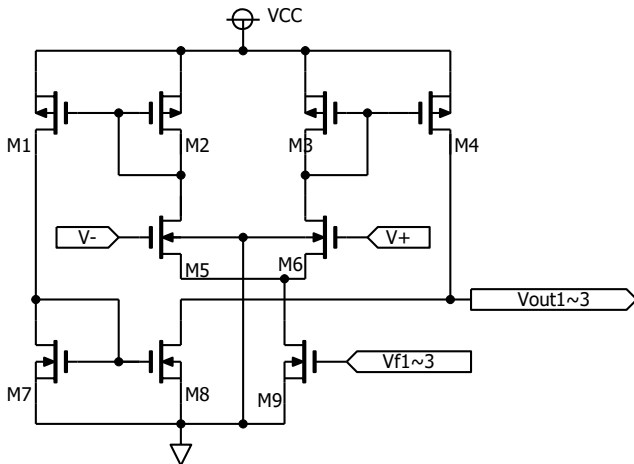


Figure 3. OTA (Operational Trans conductance Amplifier)

Fig.4 に Fig.1 の出力 3 における入力正弦波の周波数 10kHz, 100kHz, 1MHz 時のシミュレーション結果を示す. 図中, 縦軸は出力 3 の電圧値を, 横軸は時間を示している. 同図より, 入力周波数が高いほど樹状突起出力の最大電圧値を抑制することを示している.

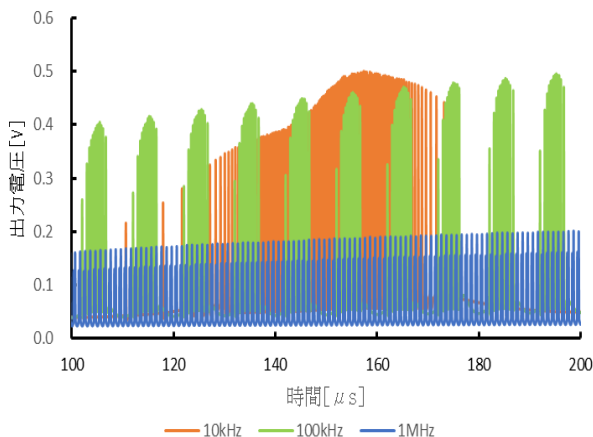


Figure 4. Output waveform (Output 3)

Fig.5 に入力周波数が 100kHz の時, Fig.1 における各出力のシミュレーション結果を示す. 図中, 縦軸は出力 1~3 の電圧値を, 横軸は時間を示している. 同図よ

り, ある周波数を印加する条件下において各出力の減衰の程度が異なり, 入力側に近いほど大きく減衰することを示している.

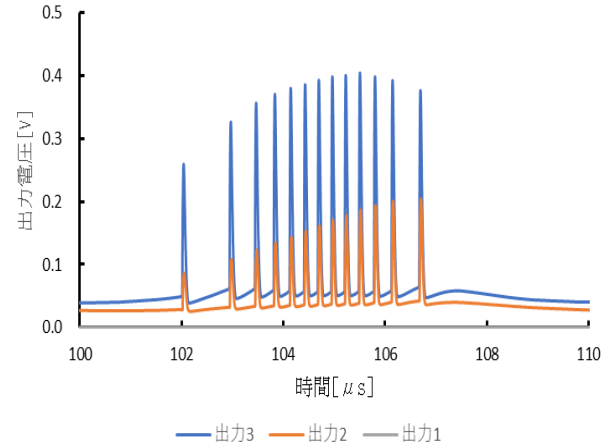


Figure 5. Output waveform (input 100kHz)

3. まとめ

今回, 周波数特性を有する樹状突起モデルについて検討を行った. その結果, バンドパスフィルタ+半波整流回路を用いて周波数-電圧変換を行い, OTA を用いて発火波形を制御することで, シミュレーション上において, 出力の最大電圧値に樹状突起が持つとされる周波数特性を有した発火波形を, 出力することを明らかにした.

今後は, 出力の最大電圧値だけでなく発火間隔にも着目していく予定である.

4. 参考文献

- [1] H. Watanabe, H. Tsubokawa, M. Tsukada and T. Aihara, "FREQUENCY-DEPENDENT SIGNAL PROCESSING IN APICAL DENDRITES OF HIPPOCAMPAL CA1 PYRAMIDAL CELLS", Neuroscience, Vol.278, pp.194-210, 2014.
- [2] Mark T. Harnett, Judit K. Makara, Nelson Spruston, William L. Kath & Jeffrey C. Magee, "Synaptic amplification by dendritic spines enhances input cooperativity", nature, Vol.491, No.7425, pp.599-602, 2012.
- [3] 丹羽春太, 佐伯勝敏, 佐々木芳樹, "集積化可能な能動的樹状突起モデルの構築" 電気学会電子回路研究会資料, ECT-19-087, pp.31-34, 2019.