

生理学見地に基づいた信号処理機能を持つ神経細胞の等価回路

前田 幸徳[†] 草野 玄[†] 張 曉林[‡]

東京工業大学 総合理工学研究科^{†‡}

1. はじめに

神経系における研究は 200 年以上前から行なわれており、生体内で行なわれている情報の伝達に関する生体細胞の動きが判明してきている。神経細胞による伝達信号は、それらを構成する細胞膜・細胞内外液や、膜に存在する選択透過性を持つ様々なイオンチャンネルによって起こされている。神経細胞における一連の挙動により生じたパルス信号は、その密度により情報を伝え、全身を制御している。これら生体における挙動を数学的に表記し、神経系研究に大きな影響を及ぼしたものととして、Hodgkin, Huxley らの研究がある。彼らの創り上げた Hodgkin-Huxley 回路モデルは、現在でも細胞膜挙動を解説するに当たって理解しやすく、よく用いられるものである。このモデル以降、工学分野からも様々な研究が行なわれ、数々の神経パルス回路が見受けられるようになったが、パルス列による細胞間の情報通信、膜を介する信号入力と出力などの関係は、十分解析されていないものである。

これらを踏まえ、本研究では神経細胞膜の挙動を等価回路で再現すると共に、シナプスにおける神経細胞同士の結合を考慮に入れたシナプス回路を組み込むことにより、生体情報処理特性を持つ神経細胞等価回路モデルの構築を目指している。

2. 神経細胞膜の電気特性

神経細胞や筋細胞のような興奮性をもつ細胞のみならず一般の細胞でも一定の静止膜電位をもつことは周知の事実である。イカの巨大神経を例に挙げ、細胞膜の電気特性を見ていく (図 1)。膜を介するイオンには、電気力と化学力のつり合いによる平衡電位を持っている。細胞膜の場合、イオンによる選択透過性があるため、静止膜電位は透過性の高いイオンの平衡電位に偏りを見せる。ここで、イオンの濃度勾配により生じる浸透圧の問題を解決するために図のようなイオンポンプ^(2,3)を持ち、 Na^+ と K^+ を絶えず入れ替えを行なっている。神経細胞の膜電位はシナプスなどの刺激によって高くなり、

ある一定の閾値を超えると Na^+ チャンネルが開き細胞外液の高い濃度の Na^+ はチャンネルを通して細胞内部に流れ込むことで、細胞の膜電位が急激に高くなる。細胞の膜電位が急激に高くなるにつれ K^+ チャンネルが開き細胞内液にある高い濃度の K^+ はチャンネルを通して細胞外部に流れ出し、細胞の膜電位が急激に下がる。このようにして神経細胞が一つのパルスを発生する。

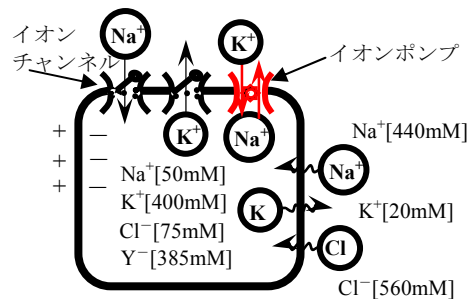


図 1. イカ巨大神経の電気的特性の概念図

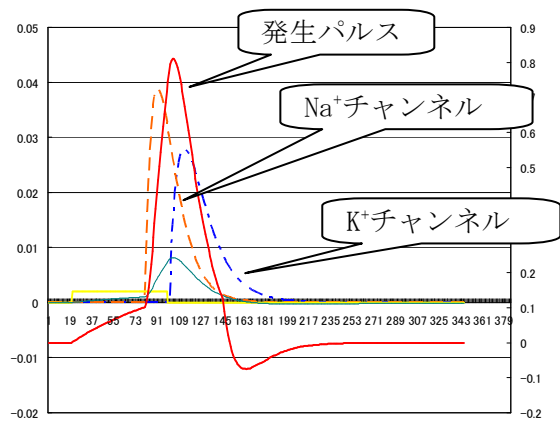


図 2. イオンチャンネルの挙動と活動電位の関係⁽²⁾

3. 神経細胞体の等価回路

図 3 は本研究で提案した細胞膜の電気的等価回路である。コンデンサ C は細胞膜の電気容量に相当し、コンデンサの電位差は細胞膜の膜電位に相当する。 E_0 は静止膜電位を維持するための電源であり、イオンポンプ、不透過性陰イオンなどの役割を果す⁽²⁻⁴⁾。 E_{Na} , E_{K} はそれぞれ Na^+ , K^+ の細胞外液と内液のイオン濃度差により生じた化学ポテンシャルの等価電位である。 g_{Na} と g_{K} は

An equivalent circuit of neuron with signal processing functions based on physiology.

[†]Yoshinori MAEDA · Tokyo Institute of Technology

[†]Haruka KUSANO · Tokyo Institute of Technology

[‡]Xiaolin ZHANG · Tokyo Institute of Technology

それぞれ Na^+ と K^+ の細胞膜全体にあるイオンチャンネルが開くときの電氣的コンダクタンスである。 g_0 は細胞膜の透過性イオン全体に対する等価コンダクタンスである⁽⁴⁾。 図3の中の各 relay 回路により、 E_{Na} 、 E_{K} へのスイッチが ON, OFF され、細胞膜の挙動を再現する。

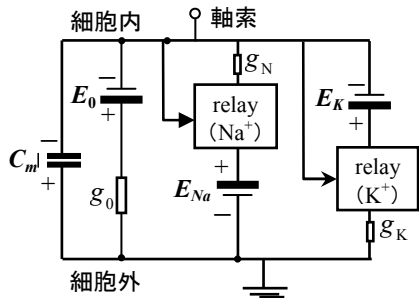


図3. 神経細胞体の電氣的等価回路

4. シナプスの電気特性と等価回路

シナプスの信号伝達の挙動は図4に示す⁽²⁾。 神経細胞間の信号は、シナプスと呼ばれる化学物質の放出・結合によって行なわれる。 軸索から伝わってきたパルス信号がシナプス前神経末端に達することにより放出された化学伝達物質がシナプス後膜の受容体と結合することにより後膜の透過性が変化しシナプス電位が作られる。

図5は本研究において提案するシナプスの等価回路の概略図である。 Relay 回路は、一定の閾値電圧を超えると ON 状態になり、シナプスにおける化学伝達物質量に準じた起電力 E_{Na} を細胞膜へ流すことができる。 このモデルでは、コンデンサ C_C と抵抗 g_T を調節することによって Relay の ON 時間を調節することができ、 g_C を調節することによって細胞体等価回路へ流れる電流量を調節することができる。 すなわち、 C_C 、 g_T 、 g_C でさまざまな神経伝達物質とそれに対応するチャンネルの機能を模擬することができるようになっている。

5. 結果及び展望

図6は実際に構築した神経細胞等価回路の一例である。 得られたシミュレーション結果を図7に示す。 今回、図7は入力信号の2パルスに対して、1パルスの出力をさせており、比例ゲイン要素を持たせた場合の結果である。 またシナプス回路を介することで、足し算、引き算といった信号を統合する作用が取り入れることが可能である。 シナプス電位も様々なチャンネルに対応できるように、形状を変化させることが可能である。

以上のように、細胞膜とシナプスの電気等価回路を構築することによって、生体信号処理特性であるパルス密度による情報伝達を可能にした。 このような信号伝達機能の特徴は、ノイズに強く、安定した情報処理を行なうことが可能である点である。 また、大規模の並列演算、例えば数百万の入力の処理を一つの神経細胞ユニットで同時に行うことが可能、という新たな演算処理原理として有用になりえることが考えられる。

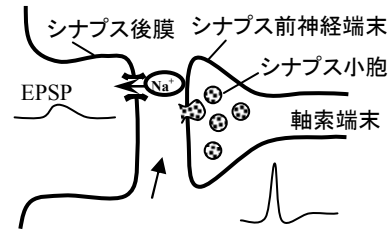


図4. シナプスの等価回路

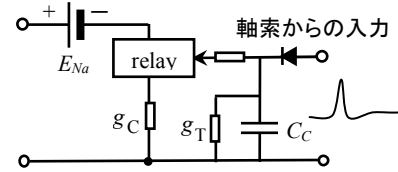


図5. シナプスの伝達信号

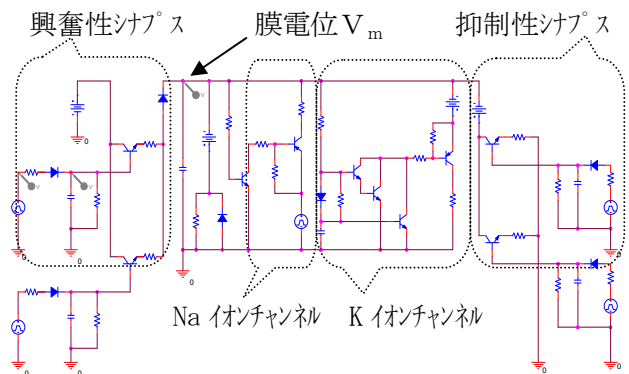


図6. 神経細胞膜の電氣的等価回路

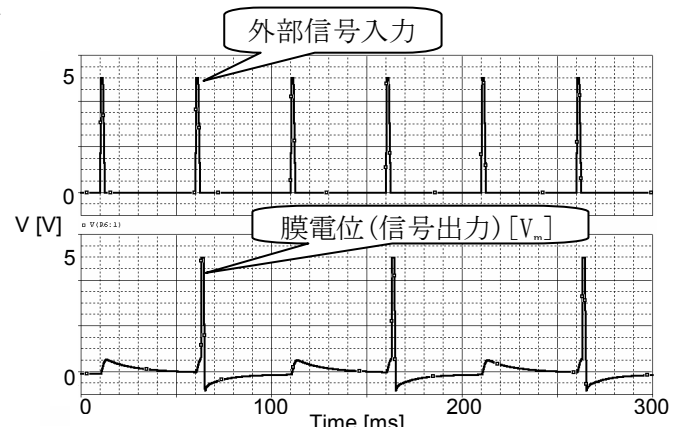


図7. シミュレーション結果

参考文献

- (1) A. L. Hodgkin: Ionic movements and electrical activity in giant nerve fibres, The Croonian Lecture, Proc. Roy. Soc. B, vol. 148, (1962).
- (2) Z.W. Hall, Molecular neurobiology (脳の分子生物学, 吉本智信, 石崎泰樹 訳), MEDSI, Tokyo (1996).
- (3) X. Zhang and H. Wakamatsu: Equation for resting membrane potential of cell, Proc. Int. Symp. on Artificial Life and Robotics, 6, 439-442(2001)
- (4) 張 曉林, 若松秀俊: イオンの能動輸送を考慮した神経細胞の等価回路, 電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集, 千葉, 683-684(1999)