

神経系の電氣的構造と機能

特任教授 深澤 敦司

1 はじめに

Hodgikin & Huxleyは神経細胞膜を横断する電流と活動電位との関係を調べた。細胞内へのNa⁺イオンの流入、K⁺イオンの流出に対応して、活動電位が生成されることを明らかにした。つぎに時間微分方程式を用いて活動電位波形を電気回路モデルの過渡現象として説明した（1949～1952年）。この解析は基本的な以下の問題を含む。

(1) 実験の手法

Na⁺チャンネルとK⁺チャンネルによる膜電位の測定において、一方をクランプして他方を測定しているため、3要因の相互結合を遮断している。これでは共役相互作用（内部帰還）の機能を観測することは出来ない。本研究によれば膜電位とイオンチャンネルの相互作用、即ち内部帰還作用によりニューロンの活性が出現するとするのに対して、内部帰還回路を遮断している。

(2) 解析法

○ ニューロンの活性の原因を受動素子のみのモデルによって論じている。

受動素子（容量Cと抵抗R）と電池のみでは能動性は表せない。

○ 膜電流（イオンチャンネルの電流）と活動電位との関係のみに着目し、ニューロンへの入力と出力の視点がない。

これではニューロン全体の機構、特性を定性的にも定量的にも明らかに出来ない。

2 本研究

2.1 生化学的/電氣的構造と機能

ニューロンの生理学的機能が電氣的機能に対応するものと考え、これをFig. 1に示す。ニューロンはdendrite, central part (soma), axon, axon terminalより成る。前細胞のaxon terminalと当該細胞のdendriteとは入力側synapseを、当該細胞のaxon terminalと次細胞のdendriteとは出力側synapseを構成する。入出力端は複数に分岐し、周囲の多数セルと接続する。

以上は典型的構成である。(a) dendriteが前細胞の中心部に直接結合する、(b) 前細胞のaxon terminalが細胞中心部に直接結合しsynapseを形成する、(c) axonがごく短くまたはaxonを持たない等がある。特にこれらは中枢系で信号処理に関わると考えられている。

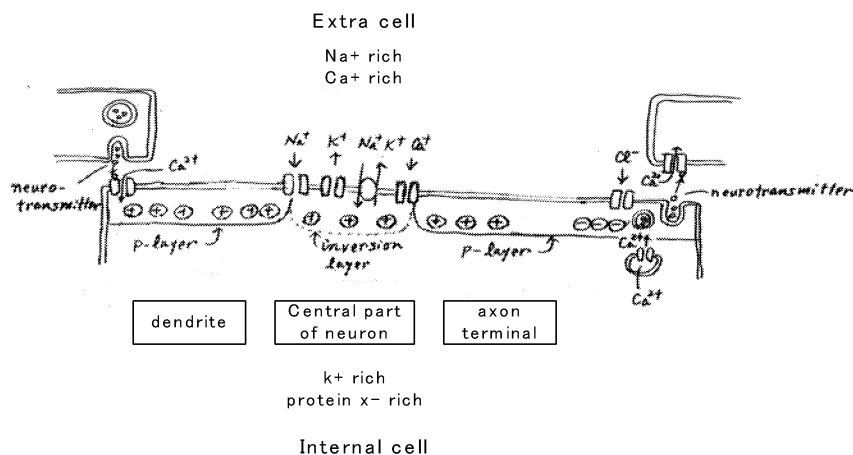


Fig. 1 Electrical and chemical composition of neuron

2.2 パルス発振の時間分解能

パルス発振波形の位相と時間の関係を考える。

電流-電圧特性 Fig. 2 で、点 p1→p2 間に要する時間を T_1 とする。これは放電の時定数に等しく、

$$T_1 \cong c r_L \quad (2.1)$$

点 p4→p3 間の時間を T_2 とする。これは充電の時定数に等しく

$$T_2 = \frac{c r_e r_a}{r_e + r_a} \quad (2.2)$$

充放電の周期 T は

$$T = T_1 + T_2 = c \left\{ r_L + \frac{r_e r_a}{r_e + r_a} \right\} \quad (2.3)$$

ここで、以下のコンデンサ c 、抵抗 r_L, r_e, r_a に対して周期 T を得る。

$$c = 1 \text{ (pF)}, \quad r_L = 200 \text{ (k}\Omega\text{)}, \quad r_e = r_a = 100 \text{ (k}\Omega\text{)} \quad (2.4)$$

$$T = 1 \times 10^{-12} \times \left(200 \times 10^3 + \frac{10^{10}}{200 \times 10^3} \right) \\ = 0.205 \times 10^{-6} \rightarrow 0.205 \text{ (}\mu\text{s)} \quad (2.5)$$

また、

$$c = 1 \text{ (pF)}, \quad r_L = 1 \text{ (M}\Omega\text{)}, \quad r_e = r_a = 0.5 \text{ (M}\Omega\text{)}$$

$$T = 1 \times 10^{-12} \times \left(1 \times 10^6 + \frac{10^{12}}{2 \times 10^6} \right) = 10.25 \times 10^{-6} \rightarrow 1.025 \text{ (}\mu\text{s)} \quad (2.7)$$

となる。波形応答を Fig. 3 に示す。なお、1(pF)のニューロンの面の広さは 1(im²)に相当する。 c を小、 r_L を大、 E_s を高くすることで、 T_2 を小、 T_1 を一定に保てる。

3 電気担体と電気材料

生物ニューロンと半導体能動素子は、異種金属元素(イオン)と伝導チャネルにより構成されるという原理に共通性が認められる。イオン化傾向の高い I a および II a 金属元素 (Na, K, Ca, Mg など) がニューロンに、遷移金属元素 (III, IV, V 族) が半導体能動素子に用いられている点が、また、ニューロンは電解液を、半導体素子は Ge, Si, GaAs などの非金属の元素または化合物が用いられている点が顕著な相違点といえる。

4 まとめ

本研究は、ニューロンの生理学的振る舞いに対応した電氣的機構について初めて詳細に論じている。まずニューロンの重要な生理学的知見について述べる。つぎに、ニューロンが増幅と内部帰還機能とにより発振回路を構成し、パルスはその出力であること、またニューロンはパルス発振素子またはスイッチ素子としてニューラルネットワークを構成すること、結論としてニューロンは電気材料を異にするものの半導体と同じ原理に基づく能動電気素子であることを明らかにしている。

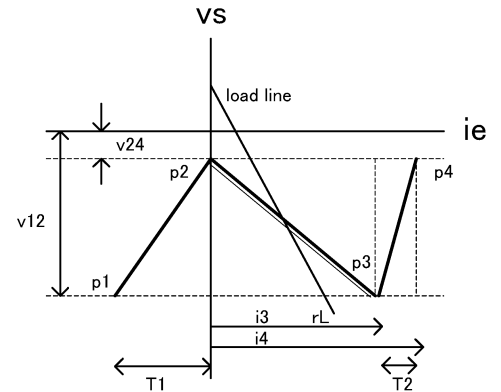


Fig.2 入力側の電流-電圧特性

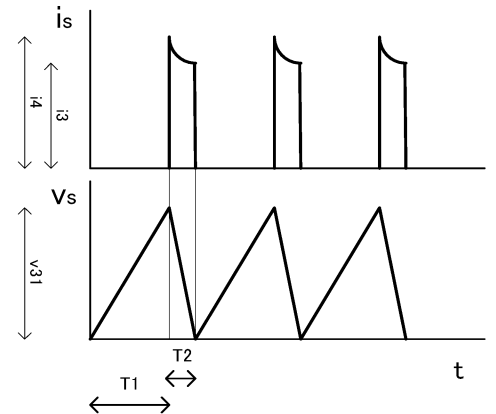


Fig.3 発振出力波形

(2.6) とすると、