

5B-3

杆体における P D E 活性化過程のアクティブフィルタモデル

薛 斯毅† 富永 陽介† 小島 正典†

†大阪工業大学 情報科学部

1. まえがき

網膜の杆体外節における光変換機構を等価回路で構成して実験検証することを目指している。光変換機構は3段の機能で構成される。ロドプシンの活性化、PDEの活性化、光感受性電流の生成である。

この発表では次段の過程を等価回路で表し、周波数応答とステップ応答を調べた。次段は2つの非線形微分方程式で表される。これは小信号の場合、アクティブフィルタによる等価回路でモデル化できる。そこで等価回路に基づいて周波数応答をシミュレーションにより予測し、ついで実験で各応答を確認した。

この結果、活性化 PDE を電圧に変換して、網膜上の像に対応した単一の杆体の応答を、実時間で3段目に伝送できる用途を得た。これによって光電流や膜電位の等価回路的な動作解析を推進できると考えられる。

2. 網膜の働き

網膜の底にある視細胞 P に達する光の強さによって視細胞の膜電位が変化し、膜電位は水平細胞 H 神経細胞 G を通ってパルスに変換され、視神経から脳に伝達される。視神経には錐体と杆体がある。

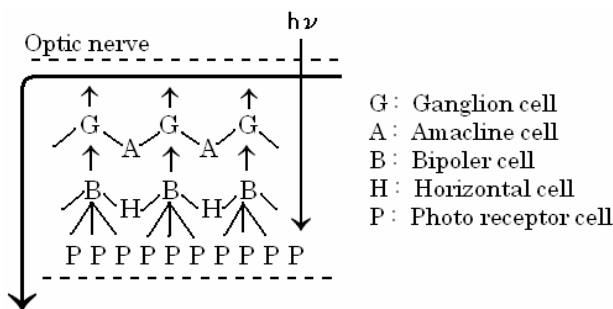


Fig.1 Structure Retina

網膜の杆体外節では光を受けるとロドプシン Rh・トランスデューション T・PDE と順に活性化が進み光電流（視覚信号）が生成される。光電流は膜電位に変換され、情報は順次脳まで伝達される。

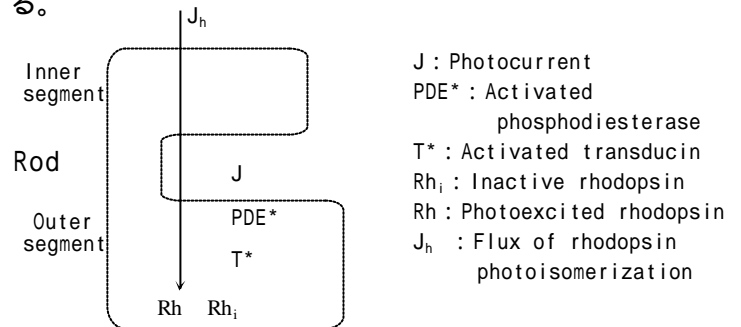


Fig.2 Phototransduction in rod

3. PDE 活性化過程モデル

Rh が PDE を活性化する過程の小信号モデルは次のように表される[1]。

$$dT^*/dt = Rh(T_{Tot} - T^*) - \tau_1 T^* + \tau_2 PDE^* \quad (1)$$

$$dPDE^*/dt = \tau_1 T^*(PDE_{Tot} - PDE^*) - \tau_2 PDE^* \quad (2)$$

Rh・T*・PDE* 各々を下付 0 を付した定常成分と下付 S を付した小信号成分に分け、2 次の小信号成分を無視すると、線形微分方程式で表すことができる。

$$dT_s^*/dt = Rh_s(T_{Tot} - T_0^*) - \tau_0 T_s^* + \tau_2 PDE_s^* \quad (3)$$

$$dPDE_s^*/dt = \tau_1 T_s^*(PDE_{Tot} - PDE_0^*) - \tau_0 T_0^* PDE_s^* - \tau_2 PDE_s^* \quad (4)$$

4. 等価回路

次の方程式が示す伝達特性は Fig.3 の等価回路で表される。

$$E_i = E + TdE/dt \quad (5)$$

Active Filter Model of PDE Activation in Retinal Rods

† Faculty of Information Science, Osaka Institute of Technology

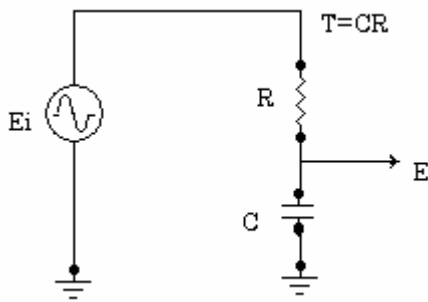


Fig.3 Integrator

(3)(4)式はつぎのように整理できる

$$T \{ (T_{Tot} - T_0^*) Rhs + {}_2 PDE_s^* \} = T_s^* + T {}_1 dT_s^* / dt \quad (6)$$

$$P {}_1 (PDE_{Tot} - PDE_0^*) T_s^* = PDE_s^* + P {}_2 dPDE_s^* / dt \quad (7)$$

(6)(7)式を(5)式と対比すると Rhs から PDE_s^* までの伝達特性は図2の等価回路で表される。ここで時定数は次のように表される。

$$T = 1 / (Rho + {}_1) \quad (8)$$

$$P = 1 / ({}_1 T_0^* + {}_2) \quad (9)$$

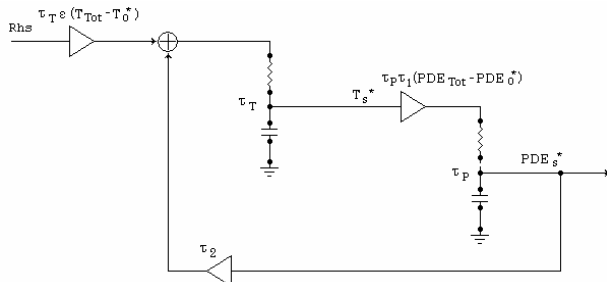


Fig.4 Equivalent circuit

5. シミュレーション

Fig.4 で示した回路を SPICE によってシミュレーションした結果、周波数特性は次のようになっている[1]。

各パラメータは次の値を使う。

$$= 0.5 \text{ sec}^{-1} \mu\text{M}^{-1}, T_{Tot} = 1000 \mu\text{M}, {}_1 = 10.6 \text{ sec}^{-1}$$

$${}_1 = 0.1 \text{ sec}^{-1} \mu\text{M}^{-1}, {}_2 = 10 \text{ sec}^{-1}, PDE_{Tot} = 100 \mu\text{M}$$

M

暗時の定数倍要素や時定数は、 Rho 、 T_0^* 、 PDE_0^* が各々0であることから定まる。

$$T = 1 / {}_1 = 1 / 10.6 \text{ sec},$$

$$P = 1 / {}_2 = 1 / 10 \text{ sec}$$

$$T (T_{Tot} - T_0^*) = 47.17 \text{ 倍},$$

$$T {}_2 = 0.9434 \text{ 倍}$$

$$P {}_1 (PDE_{Tot} - PDE_0^*) = 1 \text{ 倍}$$

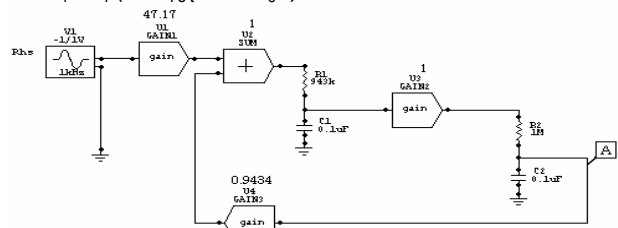


Fig.5 Simulated circuit

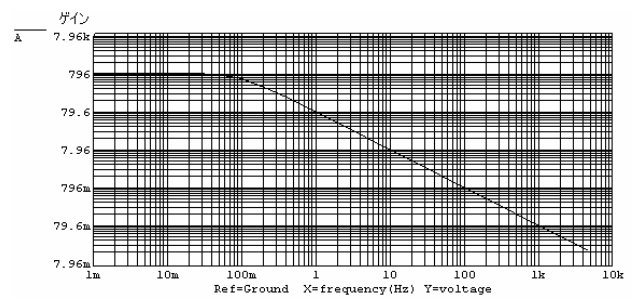


Fig.6 Result of simulation

6. 等価回路のアクティブフィルタ化

等価回路の定数倍要素と、帰還を行っている加算要素はオペアンプで実現できる。従って等価回路は CR と増幅器で構成するアクティブフィルタでハードウェア化が可能である。

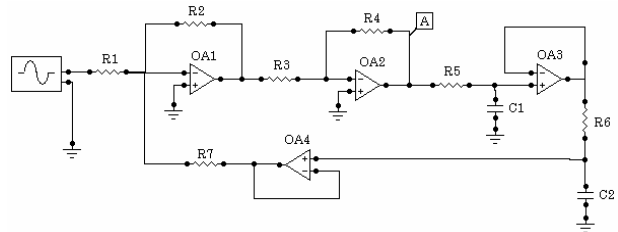


Fig.7 Active filter circuit

7. むすび

PDE の生成過程を数理モデルを元にアクティブフィルタによる等価回路でモデル化を行った。

文 献

- [1] V. Torre, S. Forti, A. Menini, and M. Canpnini : Model of Phototransduction in Retinal Rods, Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, Vol. LV., pp.563-573 (1990)