

杆体における光感受性電流生成のアクティブフィルタモデル

小池 靖十 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。初段と2段の周波数応答はすでに報告しており、この発表では終段の過程を等価回路で表し、周波数応答を調べる。終段は3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確認する。

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と化学伝達物質のグルタミン酸(gl)の放出量が増減し、水平細胞H、神経節細胞Gに順次伝達され、周期変調を伴うパルス列になって神経節から脳に伝達される。視細胞には錐体と杆体がある

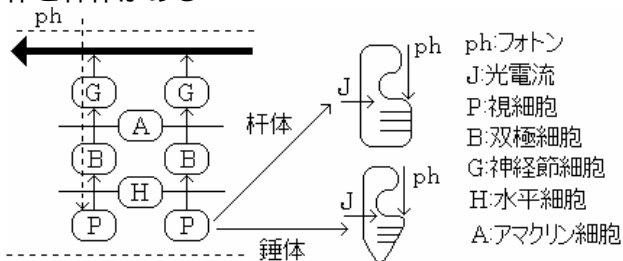


図1 網膜の構造

網膜の杆体外節では、光量子(ph)を受けるとロドプシン(Rh)、トランスデューシン(T)、燐酸ジエステラーゼ(PDE)と順に活性化される。この結果、環状グアニル酸(Ga)の濃度が低下し、イオンチャンネルを閉じるので、イオン流に伴う電流が変調される。これが光感受性電流(J)である。

3. 光感受性電流変調過程

杆体外節の光変換機構における終段の数理モデルと係数の数値を示す。Jは光感受性電流、Cはフリーカルシウムの濃度、Cbはバッファードカルシウムの濃度、Gaは環状グアニル酸の濃度、PDEは活性化燐酸ジエステラーゼの濃度である。

$$dC/dt = bJ - r(C - C_0) - dC_b/dt \quad (1)$$

$$dC_b/dt = K_1(e_t - C_b)C - K_2C_b \quad (2)$$

$$dGa/dt = A_{max}/\{1+(C/K_c)^4\} - G(V+S PDE) \quad (3)$$

$$J = J_{max}Ga^3/(Ga^3+K^3) \quad (4)$$

S:1 s⁻¹, r:50 s⁻¹, C₀:0.1 μM, V:0.4 s⁻¹,
b:0.625 μM⁻¹pA⁻¹, A_{max}:65.6 μM s⁻¹,
K_c:0.1 μM, K:10 μM, J_{max}:5040pA,
K₁:0.25 s⁻¹μM⁻¹, K₂:0.8 s⁻¹, e_t:500 μM

4. 等価回路

つぎの式は図2の回路で表される。

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

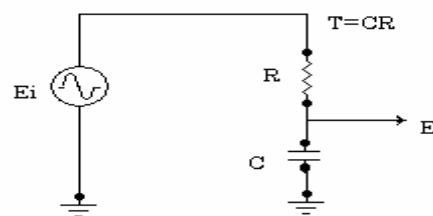


図2 積分回路

つぎに式(1)~(4)の微小信号近似をする。各変数の定常値には下付sを付し、微小変化分を小文字で表し、微小変化分のみ線形微分方程式に整理する。また、(3)(4)のCとGの関数はテーラ展開の1次で近似して、各々AとBで表す。またK₂r、V rであるからdc/dt=0とする。

$$dcb/dt = K_1(e_t - C_b_s)c - K_1C_scb - K_2cb \quad (6)$$

$$dga/dt = -Ac - S G_s pde - S PDE_s ga - Vga \quad (7)$$

$$j = Bga \quad (8)$$

$$A = 4A_{max}(C_s/K_c)^4 / \{1 + (C_s/K_c)^4\} C_s \quad (9)$$

$$B = 3J_s (J_{max}/J_s)^{1/3} / K \quad (10)$$

式(6)(7)は図2のような積分回路と信号源に置き換えられ図3の等価回路が導かれる。

Active Filter Model of photocurrent Modulation in Retinal Rods

† Faculty of Information Science, Osaka Institute of Technology

5. シミュレーション

図3で示した等価回路をSPICEによってシミュレーションした。光感受性電流 $J=17.7\text{pA}$ 、 8.96pA 、 1.95pA での周波数応答を見た。各々、暗視、薄明視、明視下限にあたる。必要な定常値は、小信号近時での定常分の式から求めた。

表1 定常値

J(pA)	17.7	8.96	1.95
PDE(μM^{-1})	0	2.15	261

シミュレーション結果では、ステップ応答のオーバーシュートに対応した周波数応答のピークと、明るさに対応しピーク周波数の変化が確認できた。

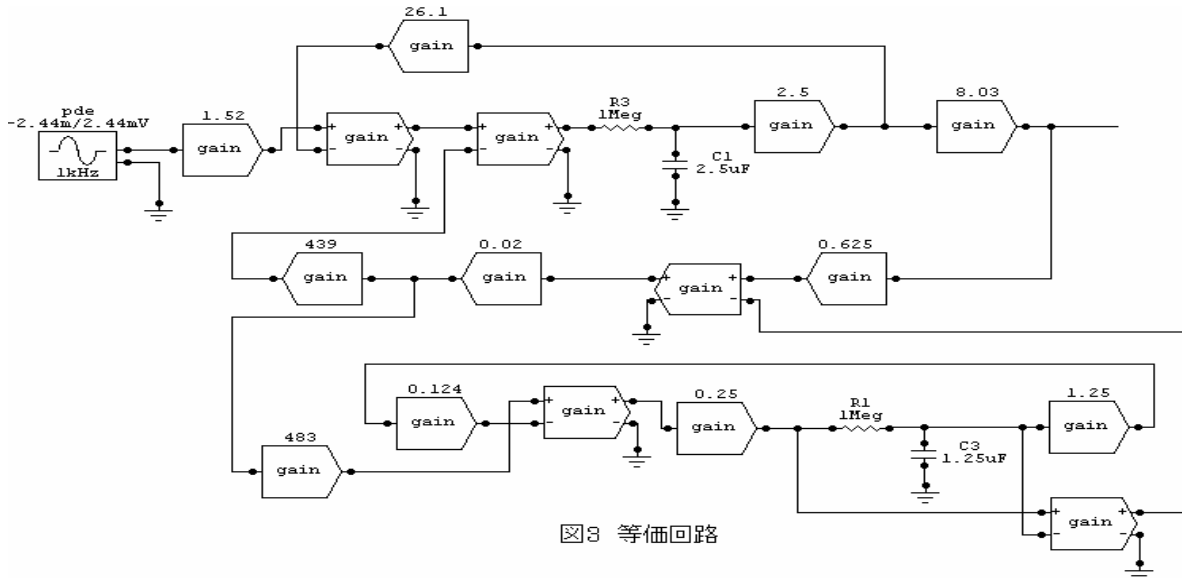


図3 等価回路

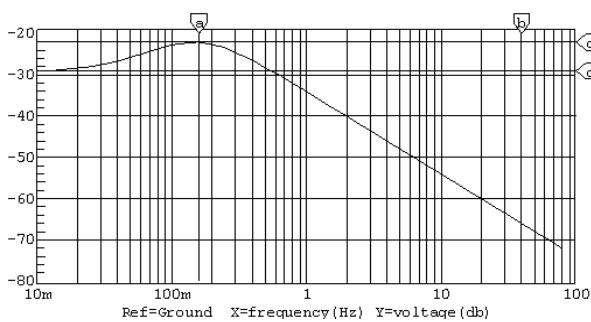


図4 ステップ応答($J=17.7\text{pA}$)

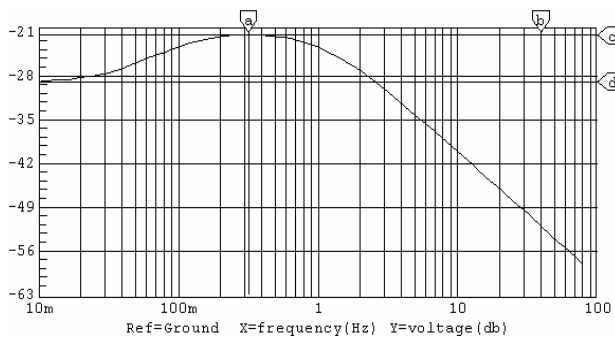


図5 ステップ応答($J=8.96\text{pA}$)

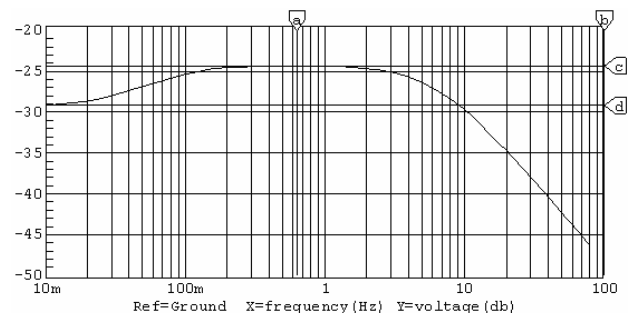


図6 ステップ応答($J=1.95\text{pA}$)

6. むすび

光感受性電流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。この結果、光変換機構の等価回路全段の動作が確認できた。今後、光電流や膜電位の等価回路的な実時間の動作解析を推進できると考えられる。

文献

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