

# 杆体外節における光電流生成過程の非線形増幅回路モデル

小島 正典† 富永 陽介† 小池 靖†

†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感受性電流の生成は12の微分方程式で表されている。数値計算によると、光感受性電流の変化を9倍にするための活性化ロドプシンの変化は約1000倍必要である。すなわち対数的圧縮をしていることが分かる。この発表では、これを非線形増幅器とCRフィルタによる等価回路で表せることを示す。そして、この等価回路をシミュレーションするにより、数値計算の場合と同様な対数的圧縮特性とステップ応答を確認する。

## 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従って視細胞の膜電位と化学伝達物質のグルタミン酸の放出量が変化し、双極細胞B、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。

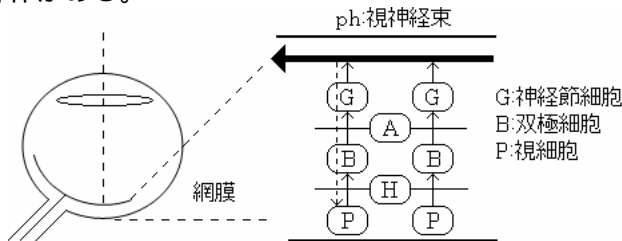


図1 眼球と網膜

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. 数理モデル

杆体外節の光変換機構の数理モデルと係数の数値を示す。光量子流  $J_p$  と光感受性電流  $J$  以外の変数は濃度  $C$  である。また、 $C$  はフリーカルシウム、 $C_b$  はバッファードカルシウムである[1]。

$$d Rh/dt = J_p - a_1 Rh - a_2 Rh_i \quad (1)$$

$$d Rh_i/dt = a_1 Rh - (a_2 + a_3) Rh_i \quad (2)$$

$$d T/dt = e Rh(T_t - T) - t_2 PDE \quad (3)$$

$$d T/dt = t_1 T(PDE_t - PDE) - t_2 PDE \quad (4)$$

$$d C/dt = bJ - r(C - C_0) - d C_b/dt \quad (5)$$

$$d C_b/dt = K_1(e_t - C_b)C - K_2 C_b \quad (6)$$

$$d Ga/dt = A_{max} / \{1 + (C/K_c)^4\} - G(V + S \text{ PDE}) \quad (7)$$

$$J = J_{max} Ga^3 / (Ga^3 + K^3) \quad (8)$$

$a_1: 20s^{-1}$ ,  $a_2: 0.0005s^{-1}$ ,  $a_3: 0.05s^{-1}$ ,  
 $e: 0.5 s^{-1} \mu M^{-1}$ ,  $T_t: 1000 \mu M$ ,  $P_t: 100 \mu M$ ,  
 $t_1: 0.1 s^{-1} \mu M^{-1}$ ,  $t_2: 10 s^{-1}$ ,  $b_1: 10.6 s^{-1}$ ,  
 $S: 1 s^{-1}$ ,  $r: 50 s^{-1}$ ,  $C_0: 0.1 \mu M$ ,  $V: 0.4 s^{-1}$ ,  
 $b: 0.625 \mu M^{-1} pA^{-1}$ ,  $A_{max}: 65.6 \mu M s^{-1}$ ,  
 $K_c: 0.1 \mu M$ ,  $K: 10 \mu M$ ,  $J_{max}: 5040 pA$ ,  
 $K_1: 0.25 s^{-1} \mu M^{-1}$ ,  $K_2: 0.8 s^{-1}$ ,  $e_t: 500 \mu M$

## 4. 等価回路

つぎの式は図2の回路で表される。

$$TdE/dt = E_i / T - E / T \quad (9)$$

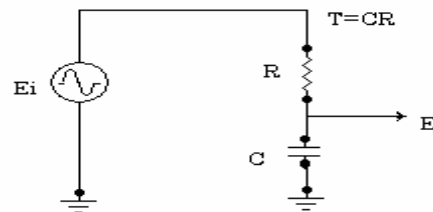


図2 CRローパスフィルタ

式(1)~(7)は、図2のようなCRフィルタ回路と信号源におきかえられ、図3の等価回路が導かれる。ただし、式(5)で  $dC/dt=0$ 、式(8)で  $J = J_{max} (Ga/K)^3$  と近似している。

ここで各変数の定常値に下付  $S$  と付し、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。

Nonlinear Amplifier Model of Photocurrent Modulation in Retinal Rods

† Faculty of Information Science, Osaka Institute of Technology

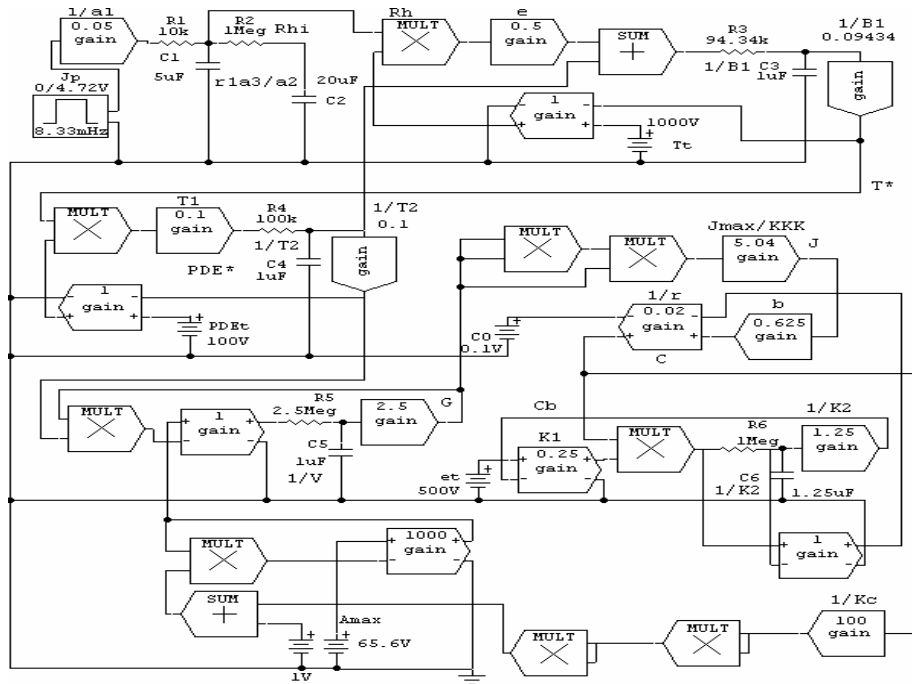


図3 等価回路

## 5. シミュレーション

図3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る[1]。ステップ応答の周期は120秒で振幅は表1による3段階で実施した。

表1 ステップ応答の振幅

J(pA)	17.7	8.96	1.95
Jp(μMs <sup>-1</sup> )	0	0.072	4.72

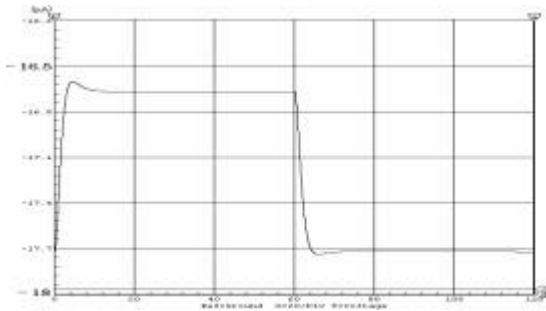


図4 ステップ応答(J=17.7pA)

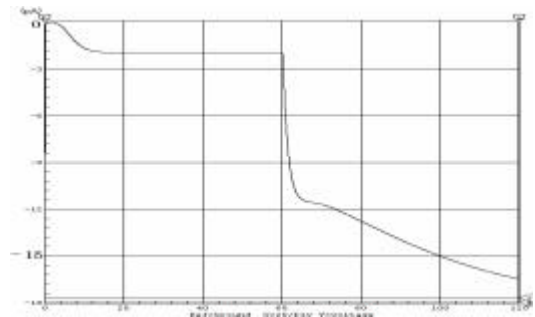


図6 ステップ応答(J=1.95pA)

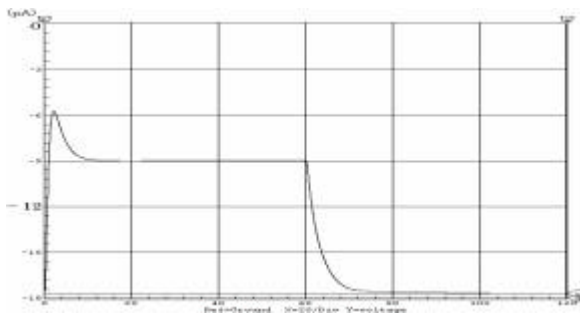


図5 ステップ応答(J=8.96pA)

## 6. むすび

杆体の光変換機構の数理モデルを非線形増幅回路モデル化し、圧縮特性とステップ応答を確認した。非線形増幅器には乗算回路が使えるので、等価回路全体のハードウェア化が可能となり、実時間での網膜信号処理の研究を推進できると考えられる。

## 文献

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