

網膜桿体視細胞の情報伝達クリッピング特性のシミュレーション解析

情報科学科 八澤 雄大

指導教員：神山 斉己

1 はじめに

網膜の最外層に位置する桿体視細胞は外界からの光情報を受容する細胞であり、光情報を次細胞に伝える機能を持っている。先行研究では桿体視細胞に関する電気生理学的な知見に基づいたリアリスティックな数理モデルが提案された。また、桿体視細胞間のギャップ結合に関する解剖学的特性に基づいたネットワークモデルが提案された。モデルの応答が実際の網膜上の応答を再現しており、ネットワーク上における桿体視細胞の応答の推移やフィルタ特性の再現に成功した。一方、二次ニューロンへの情報伝達では信号伝達にクリッピングを生じさせる非線形性が存在しており、ギャップ結合はそうしたクリッピングへ影響を及ぼしている可能性が考えられるが、その仕組みや特性の解明には至っていない。

そこで本研究では、最新の知見に基づいた、桿体ネットワークの数理モデルを通して、桿体視細胞ネットワークに光を照射したシミュレーションから、クリッピング特性を解析する。さらに、桿体視細胞ネットワーク上におけるギャップ結合の特性が二次ニューロンへどのような影響を与え、視覚情報処理にどのように関わっているかを明らかにする。

2 桿体ネットワークモデル

桿体視細胞はギャップ結合による二次元的な配列をしている。先行研究 [1] にて Kamiyama ら [2] の桿体モデルを二次元ネットワークモデル状に組み立てることで桿体視細胞ネットワークモデルを実現した。その結果、光が照射されていない桿体視細胞にも光応答を確認することができた。

2.1 桿体視細胞のクリッピング現象

桿体視細胞は光を受容すると負の方向へ過分極を発生する(図 1(a))。光を受容する際に、発生するカルシウム電流は二次ニューロンへの神経伝達物質であるグルタミン酸の放出に大きく関わっている。カルシウム電流は過分極が大きくなるほどに電流値が小さくなり(図 1(b)) グルタミン酸が放出量は 0 に近づく(図 1(c))。このため、一定以上の桿体視細胞の電位変化はクリッピングされ二次ニューロンへ正しく伝達されない可能性がある。

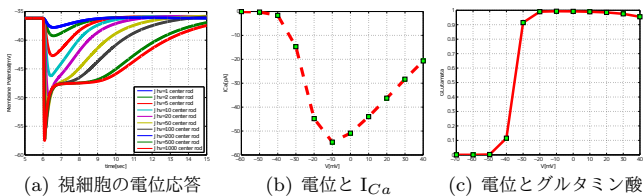


図 1 桿体視細胞の性質

2.2 構築モデル

桿体視細胞の出力は双極細胞へ伝えられ、桿体視細胞シナプス部から放出されるグルタミン酸によって、グルタミン酸電流が発生し、双極細胞の電位応答が生じる。本研究では桿体ネットワークモデルにグルタミン酸電流を入力とした双極細胞の数理モデルを統合した(図 2)。本モデルを使用してギャップ結合とクリッピングの特性を調べ、両細胞の応答電位の形状から分析する。

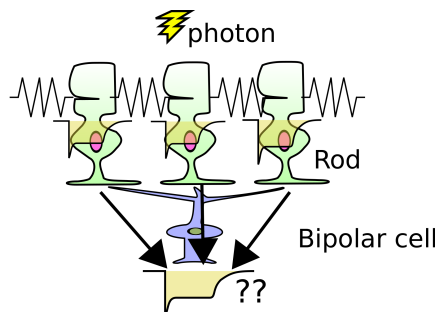


図 2 モデルのイメージ

2.3 双極細胞への入力

双極細胞は複数の桿体視細胞から入力を受ける。本モデルでは、双極細胞は真上と左右に隣接した桿体視細胞からのグルタミン酸電流の和を受けるとした。次の式はグルタミン酸電流の発生式となり、

$$I_{Glu} = \overline{I}_{glu} \frac{\exp((V - E_{glu})/125) - 1}{\exp(-(V + E_{glu})/125) + 1} \times \frac{[Glu]^{H_{glu}}}{[Glu]^{H_{glu}} + K_{Glu}^{H_{glu}}}$$

以下の式は双極細胞に入力する電流の算出方法である。

$$I_{Bipolar}(i) = \sum_{k=i-1}^{i+1} \alpha \cdot I_{Glu}(n)$$

3 シミュレーション結果

図 3 は横一列に桿体間の幅を $27.8\mu\text{m}$ で並べたネットワークモデルに半径 $100\mu\text{m}$ の範囲で、ギャップ結合を加味した場合と、ギャップ結合の有無で同程度過分極する光を照射した。

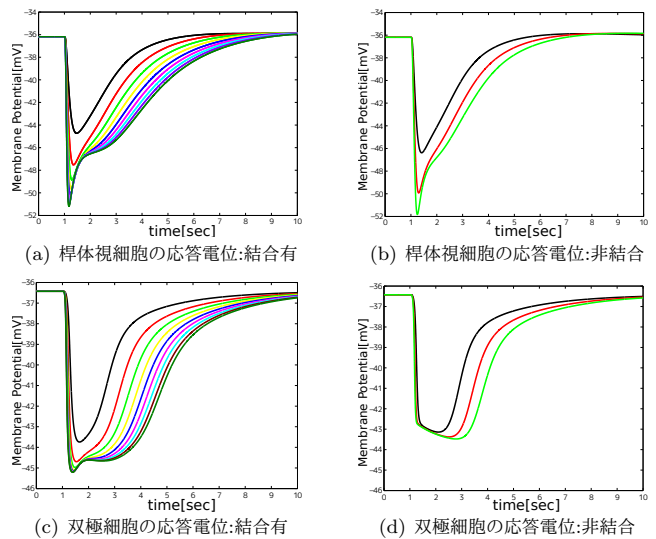


図 3 光応答シミュレーション結果

ギャップ結合がある場合、応答電位は隣接する桿体視細胞に伝達する。その受け渡された信号を双極細胞に伝達することで、双極細胞は真上にある桿体視細胞本来の電位応答波形に近い形で受けとることがわかった。また、ステップ光を照射した場合でも同様の特性が確認できる。ギャップ結合は機能として、桿体の電位応答をやや小さくする機能を持つと共に、クリッピングされる視覚情報を他の桿体へ伝達することで、クリッピングによる視覚情報の損失を防いでいる事がわかる。網膜上では桿体は二次元的に結合しており、双極細胞も同じように複数の桿体視細胞と情報伝達を行うために、モデルを大きく拡張することで、SN 比の向上や、クリッピングの影響を小さくした応答をより詳細に再現できる。

4 まとめと課題

桿体ネットワークモデルに双極細胞の数理モデルを統合することで、ギャップ結合とクリッピングの関係性を明らかにすることができた。このシミュレーション解析は視覚初期過程における、光情報処理のメカニズム解明への足掛かりとなると考えられる。また、今後の課題として、水平細胞等のモデルを取り入れることでより詳細な視覚機能の解明へと繋がると考えられる。

参考文献

- [1] 宮本侑典 (2008), 平成 20 年度修士論文.
- [2] Kamiyama, Y., Wu, S. M., Usui, S. (2009), Vision Research, 49, 970-978.