

大脳新皮質のニューロンにおける奇妙な応答の原因の究明

The investigation of the causes of peculiar responses in neurons of the neocortex.

神経情報システム研究室 bp20025 平岡立成 指導教員 保坂亮介准教授

1 はじめに

神経系の基本的な機能単位はニューロンと呼ばれる細胞にあり、単一のニューロンは、隣接するニューロンにより電流が入ると、細胞表面のイオンチャネル等の働きにより膜電位を急激に上昇・下降させることでスパイク発射させる。そのスパイクの発射タイミングやスパイク間隔が、脳が行っている情報処理の解明において重要なファクターとなる。

その中でも、大脳新皮質のニューロンは不規則なスパイク列を生成することが知られている。その不規則なスパイク列の原因として、次の2つが考えられる。

- ニューロンの持つスパイク生成メカニズムが不規則なスパイク列を生成している
- ニューロンへの入力の不規則なために、出力であるスパイク列も不規則となっている

ニューロンが、隣接する十分大きな個数のニューロンから互いに独立なスパイク列を入力として受け取ると、その総和は白色ガウスノイズで近似することができる (Tuckwell, Introduction to Theoretical Neurobiology, 1988) [?].

Sakai らは、単一ニューロンの原初の数理モデルである Hodgkin-Huxley モデルを用いた研究で、入力の分散が大きくなるほど、出力スパイク列のスパイク間隔の分散が小さくなる奇妙な現象を報告している (Sakai et al, UCN, 2002)。Hodgkin-Huxley モデルは、実際の実験データに忠実に基づいたモデルである分、その複雑さから、Leaky integrate-and-fire モデルや FitzHugh-Nagumo モデルを始め、簡略化されたモデルがいくつか存在する。この奇妙な現象は、Leaky integrate-and-fire モデルにおいては見られず、入力の分散が大きくなるほど、出力スパイク列のスパイク間隔の分散が大きくなった (Sakai et al, IJCNN, 2002)。これに対し、Hosaka らは Hindmarsh-Rose モデルを用いて、この奇妙な現象の原因が、ニューロンの双安定性に起因することを指摘している (Hosaka and Sakai, Physical Review E, 2015)。

先にいくつか上げたニューロンの数理モデルは、Hodgkin-Huxley モデルをはじめとする。イオンチャネルのダイナミクスを考慮したコンダクタンスベース

と、考慮しないカレントベースのモデルに区分できるなど、数理モデルごとに、数式として陽に記述する機能の範囲に差が存在する。Leaky Integrate-and-fire モデルや Hindmarsh-Rose モデルはカレントベースのモデルであり、イオンチャネルとの対応が存在しない。したがって、Hodgkin-Huxley モデルで見られた奇妙な現象の理由が双安定以外にある可能性が否定できない。

そこで本研究では、以下の段階により、この奇妙な応答が起こる原因を確認することを目的とする。

[?].

2 奇妙な応答の確認

先行研究で示されている奇妙な応答を再現する。モデルには一般的なパラメータの Hodgkin-Huxley モデルを用いる。入力には、平均と分散という2つのパラメータで表現可能な白色ガウスノイズを用いる。入力の分散を徐々に変化させていき、その際のニューロンのスパイク列のスパイク間隔の統計量を計算する。また、この際、スパイク間隔の平均値が一定になるよう入力の平均も分散と同時に変化させる。スパイク間隔の変動係数 (Coefficient Variation, CV) を計算し、入力の分散とともに図示することで奇妙な応答の再現を確認する。

3 種々のイオンチャネルの応答

前述したように、一般的なパラメータの Leaky integrate-and-fire モデルはカレントベースであり、奇妙な現象は確認されなかったが、キャパシタンスやコンダクタンスを記述したコンダクタンスベースの Leaky integrate-and-fire モデルも存在する。また、Hodgkin-Huxley モデルは細胞表面に存在する Na^+ イオンチャネルや K^+ イオンチャネルのダイナミクスを記述するが、実際の細胞には他にも多種のイオンチャネルが存在し、それらを実装に組み込んだ場合のニューロンの応答を調べる。このような、考慮に含まれていなかった機能を実装した際の応答を観察し、この現象の要因の解明を目指す。