

海馬局所回路の同期振動と神経発火の数理的アナロジー

情報科学科 ダオ ミン フォン

指導教員：指導教員：作村諭一

1 はじめに

人間は神経組織（脳）が存在し、神経組織を構成する主役は「神経細胞」である。情報を伝達する際には、脳が情報を処理してから、神経細胞から神経細胞へと情報が伝達されて行く。この時、神経細胞では刺激の入力が統合され、細胞膜の内外に存在するカリウムイオンとナトリウムイオンの流出及び流入によって活動電位を発生させる。これらイオンの流入出を制御するのは細胞膜上のイオンチャネルであり、膜内外の電位差の変化に応答して開いたり閉じたりするものである。

一方、図1のように大脳辺縁系の一部で、主に短期記憶などを司る海馬では、興奮性神経と抑制性神経が Schaffer 側枝の電気刺激を受け、その際、海馬の局所回路において複数の神経が同期発火する現象があり、この同期発火は海馬の情報処理において重要な役割を果たしていると考えられている。解剖学的には、興奮性神経同士が gap 結合で相互活性をする、興奮性神経が抑制性神経を活性する、抑制性神経が興奮性神経を抑制する、ということが分かっている。この興奮・抑制の関係性は、ナトリウムチャネル・カリウムチャネルの関係と構造がほぼ同じであるため、海馬局所回路の同期・非同期現象を、1つの神経の発火・非発火状態とみなすことができる。

本研究では、このアナロジーを数理的に示すために、海馬局所回路の簡素な数理モデルを構築し、相平面の類似性を検証した。

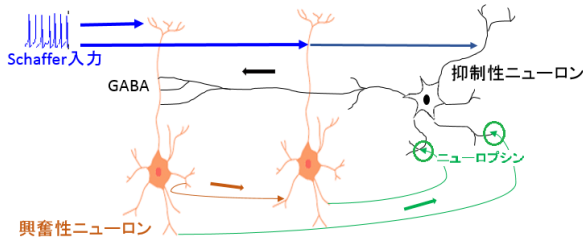


図1 海馬局所回路の同期発火の原理の作業仮説

2 研究手法

2.1 神経細胞モデル

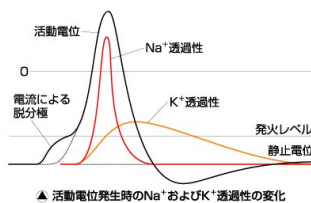


図2 スパイク発生時の Na⁺ 及び K⁺ チャネルのコンダクタンスの変化 [2]

脳が活動電位を発生する現象の基本を表現する数理モデルの例として Hodgkin-Huxley モデルが挙げられる [1]。Hodgkin-Huxley モデル は各イオンのコンダクタンスに対して動力学的記述 kinetic description を与え、記述に必要なパラメータを実験的に決定したもので、単一ニューロンモデルとして、の4つの変数からなる非線形微分方程式で膜興奮現象の基本を表現する数理モデルである (図2)。

2.2 シナプスモデル

神経間のシナプス結合は、一般的に α 関数を用いてモデル化される (α シナプス)。本研究においても興奮性と抑制性の間を

シナプスで表現する。 α 関数は以下の式で定義される。

$$g_{syn}(t) = At \frac{\exp(-t + t_{peak})}{t_{peak}} \quad (1)$$

ここで、 A はコンダクタンスの最大値、 t_{peak} は最大となる時間である。海馬局所回路のモデルにおいては、Shaffer 側枝からの入力を Poisson 過程で行い、局所回路内での入力は神経の発火時刻でシナプス入力を行う。

3 研究結果

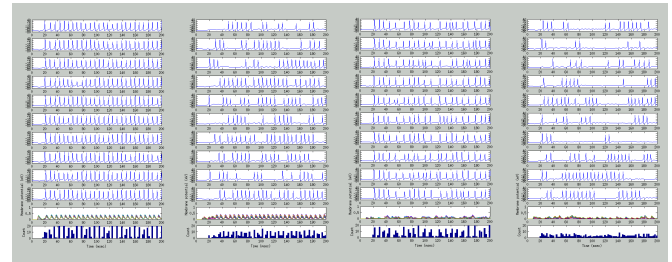


図3 海馬局所回路興奮性ニューロンの結果。左から海馬局所回路の通常、Gap 結合がない場合、興奮性ニューロンから抑制性ニューロンへの制御がない場合、すべてがない場合

海馬局所神経細胞の中には興奮性ニューロンが 80% に対して、抑制性ニューロンは 20% 含まれる。本研究では興奮性ニューロンを 20 個、抑制性ニューロンを 5 個とし、シミュレーションを行って、海馬局所回路興奮性ニューロンの同期発火現象と相平面を検討する。

これらの結果から、通常海馬局所回路には興奮性ニューロンの同期発火現象が確認でき、条件を変えると、非同期発火現象になることがわかる。また、 Na チャネル・ K チャネルの開放率、および興奮性・抑制性神経の発火頻度について位相平面を描いたものが図4、5である。ともに、リミットサイクルで状態が遷移していることを示しており、単一細胞と局所回路が数理的にアナロジーを持つことを意味する。

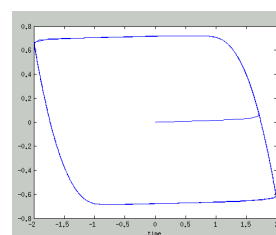


図4 神経細胞 2 変数の位相平面

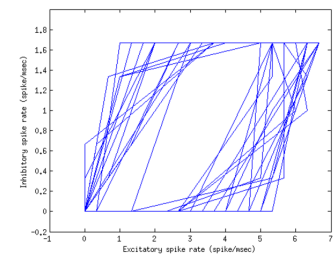


図5 海馬局所回路興奮性、抑制性の発火数の位相平面

4 終わりに

本研究では、海馬局所回路の同期発火現象と、海馬局所回路の同期・非同期現象、1つの神経の発火・非発火状態の相平面の類似性を検証することができた。

参考文献

[1] 宮川博義・井上雅司 共著 『ニューロンの生物物理』丸善株式会社,2003,pp 40-53
 [2] <http://www.geocities.jp/tappingtech/synapse.html>