

ニューラルネットワークのダイナミクス に関する基礎的研究

山本光璋 中尾光之 水谷好成

東北大学工学部情報工学科生体情報工学講座

はじめに

脳は巨視的に見るとその意識状態を時々刻々と変化させている。一方微視的に見ると基本素子である個々のニューロンは、意識状態に依存して自発発射と呼ばれる内発的活動を常に続けている。この内発的活動は、脳が新しい環境に適應し、創造的活動をなすための原動力であろうと考えられている。本研究は、動物の睡眠-覚醒サイクルにおいて観測されるところの脳単一ニューロン活動のダイナミクスを、ニューラルネットワーク・モデルによりシミュレートし脳の基本的制御機構におけるその意義を明らかにすることを目的としている。

睡眠-覚醒サイクルにおける脳単一ニューロン活動のダイナミクス

ネコの脳の単一ニューロン活動を中脳網様体、視床腹側基底核、大脳皮質体性感覚野、海馬などで記録し、その時系列的なダイナミクスを調べた結果、以下の事実が明らかとなっている¹⁾

- (1) 徐波 (ノンレム) 睡眠時のニューロン活動は、0.01 ~ 1.0 Hz の帯域でそのスパイク密度時系列がほぼ白色雑音様のパワースペクトル密度を示す。
- (2) 逆説 (レム) 睡眠時には、これが 1/f 様スペクトル密度に変化する。
- (3) 覚醒時、動物に (眼前に小鳥を見せて) 注意集中させたときには、高周波域 (0.1 ~ 1.0 Hz) において 1/f 様スペクトルを示す場合が見られたが、低周波域 (0.01 ~ 0.1 Hz) では白色化する傾向が強い。

かようなダイナミクスの違いが、脳の広領域に分布する多様なニューロン群において普遍的に見られることは驚くべきことであり、そのメカニズムについて生理学的薬理学的検討がなされた。その結果、脳幹に存在しその軸索を脳内にくまなく張りめぐらしているセロトニンニューロン活動の有無と、前記スペクトル特性の差違とが密接に相関していることが明らかにされた。すなわちそのセロトニンニューロンが活動している間は、抑制作用が脳内に広く及び単一ニューロン活動は安定化しスペクトルは平坦となる。逆に同ニューロンが活動停止したときには脱抑制状態となることにより、脳単一ニューロン活動にはゆらぎがあらわれ、1/f 様スペクトルを示すようになる。この作業仮説を検証するために以下にのべるニューラルネットワークによるシミュレーションを行った。

ニューラルネットワークが生成する状態遷移時系列のダイナミクス

本研究で用いたのはよく知られた対称な相互結合型のニューラルネットワークモデルで、単位時間内では1ニューロンしか内部状態を変えない、即ち非同期型といわれるものである。これは必ずしも神経生理学的な知見を普く網羅しているとは言いがたいが、実際の神経回路網の協同的な振舞いは再現しえるものと考ええる。我々のネットワークモデルにおいては、 i 番目のニューロンに関する状態遷移則は以下のように与える。

$$u_i(t+1) = \sum_{j=1}^N W_{ij} x_j(t) - h_i(t+1) + n_i(t+1), \quad [1]$$

$$x_i(t+1) = g(u_i(t+1)), \quad g(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \\ i = 1, 2, \dots, N,$$

ただし、シナプス荷重は相関学習の場合と同様に

$$W_{ij} = \begin{cases} (1/N) \cdot \sum_{m=1}^M (2x_{im} - 1)(2x_{jm} - 1) & \text{for } i \neq j, \\ 0 & \text{for } i = j, \end{cases} \quad [2]$$

のように与えた。ここに、 N はニューロン数 (=100)、 t は離散的な時刻、さらに M は記憶パターン数をそれぞれ表わす。 $\{n_i\}$ は平均 0、分散 σ_n^2 の正規白色過程であり、 $\{h_i\}$ ($=h$) はセロトニン系による抑制性入力表現している。記憶パターンおよび初期値は 0, 1 の 2 値を等確率でとる乱数を用いて与えた。単一ニューロンダイナミクスの遷移はパワースペクトル密度 (PSD) で示されていることから、[1] 式に従って一定回数状態遷移を行って得られた或る 1 つのニューロンの状態遷移系列 $\{x_i(t)\}$ を神経活動に見立ててその PSD を計算した。PSD の計算は 11000 回遷移を行った後の後半 10000 個の $x_i(t)$ を用いて行った。

シミュレーションの結果²⁾

ここでは、抑制性入力レベルに即して変化する単一ニューロン活動のダイナミクスの指標として、状態遷移系列の PSD を示す。図 1 に掲げた結果例は、 $M=20$ のネットワークに関するものであり、PSD の他に、遷移系列のサンプルおよび興奮期間 (連続して $x_i(t)=1$ である区間) のヒストグラムも併せて示した。同図からわかるように弱抑制時 (レム睡眠時に対応) に 1/f 様の、低域が

白色化する過程を経て、強抑制時（徐波睡眠時に対応）に白色様のパワースペクトルが得られ、それぞれの睡眠状態におけるニューロン活動のダイナミクスが良好に再現されている。状態遷移系列に関しては、抑制が深くなるにつれて状態が“1”となる比率（平均発火頻度と解釈されよう）が低下する他に、興奮期間の分布においては長期間の頻度が減り、短期間のものだけが残っている。これは、レム睡眠時よりも徐波睡眠時のほうが発火頻度が低下し、ダイナミクスが内包する不確実性が減少するという生理学的な実験・解析結果とよく一致しているように思われる。ニューロン間のダイナミクスのパラツキを調べるためにネットワークに含まれる全てのニューロンについてPSDの計算を行った結果、これまで行ったシミュレーションの範囲内では、スペクトル構造に違いはあるもののほぼ統一的に上述の遷移を呈することがわかっている。以上の結果は、ネットワークの初期状態や時間発展に用いた乱数の標本過程には殆ど依らなかった。これらは、抑制性入力の変化に伴って単一ニューロン活動のダイナミクスがPSDにおいて $1/f \rightarrow$ 白色へ遷移するという我々の考えを支持するものであると共に現象のネットワーク構造に対する“頑健さ”を示しているといえよう。

考察とまとめ

脳がニューロンを基本素子とする神経回路網によって成り立っていることは紛れもない事実であるが、そうし

た回路網を広域的に調節しているもう一つの神経回路網が存在している。その代表が脳幹に存在しセロトニンを含有しているニューロン系である。このニューロン系がどのような形で一般の神経回路網を調節しているかについては、これまで生理学的に明確でなかったと思われる。

本研究におけるニューラルネットワークによるシミュレーションの結果、このニューロン系は、高領域に分布している神経回路網を並列的に抑制することにより、そのダイナミクスを安定化している可能性が強く示唆された。これは睡眠-覚醒時に見られるニューロン活動のダイナミクスをよく説明するものであり、ニューラルネットワークの有する基本的ダイナミクスを工学的に検討していく上できわめて重要な結果であると考えられる。

文献

- 1) Yamamoto M, Nakahama H, Shima K, Kodama T, Mushiake H: Markov-dependency and spectral analyses on spike counts in mesencephalic reticular neurons during sleep and attentive states, *Brain Res* 366: 279-289(1986).
- 2) Nakao M, Takahashi T, Mizutani Y, Yamamoto M.: Simulation study on dynamics transition in neuronal activity during sleep cycle by using asynchronous and symmetry neural network model, *Biol Cybernetics* 63: 243-250(1990).

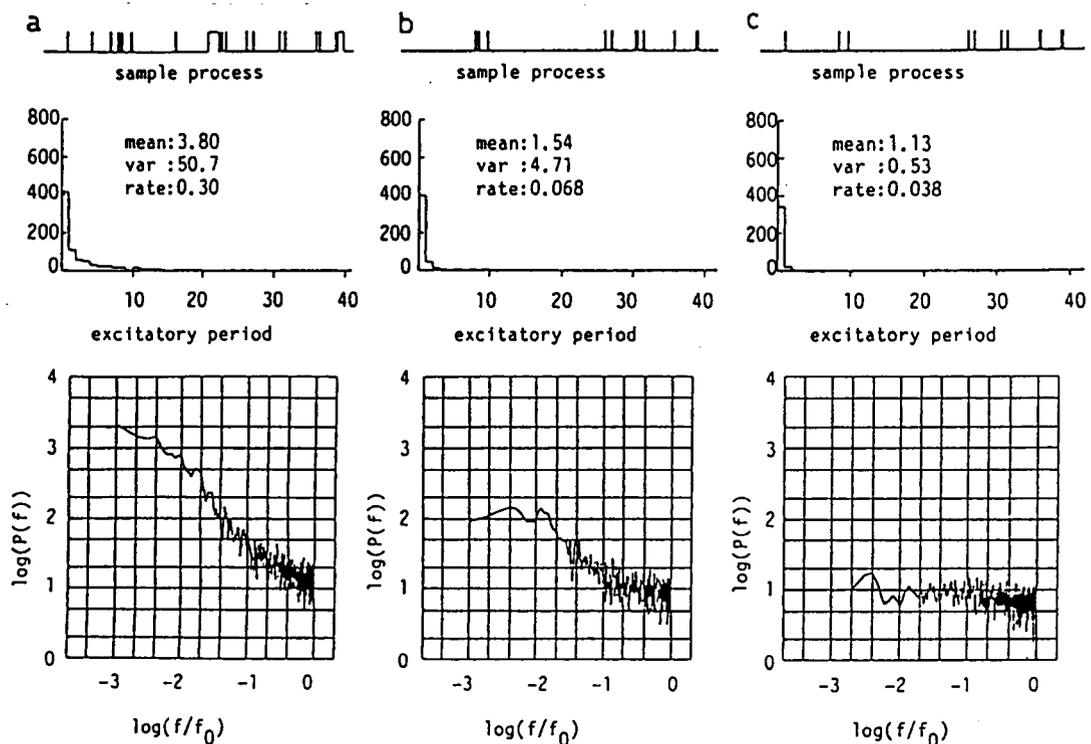


図1 ニューラルネットワークより得られた単一ニューロンの状態遷移過程のダイナミクス例これらは何れも $\sigma^2=0.26$, $M=20$ なる条件下で得られた結果で抑制入力レベルはそれぞれ a. $h=0.48$ b. $h=0.505$ c. $h=0.52$ である。サンプルとして示した遷移過程は350ステップ分である。