

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

東北大学大学院情報科学研究科生体情報学研究室

山本光璋

深い睡眠状態とされる徐波睡眠、大脳皮質脳波の活性化などで知られるレム睡眠、これら2つの睡眠状態において脳単一ニューロン活動時系列を計測しスペクトル解析した結果によれば、徐波睡眠時のスパイク頻度時系列のパワースペクトルは概ね0.01-1.0 Hzの帯域で平坦な白色雑音様を呈している。ところが、レム睡眠に入ると、それが周波数に逆比例するいわゆる $1/f$ 様となるのである。このような現象は、ネコの脳内の視床腹側基底核、大脳皮質体性感覚野、さらには、海馬ニューロンにおいても観測されており、機能の異なるニューロン群に共通したものである可能性が高い。この現象はアミン系/コリン系などの調節神経系の制御によって生じていることが分かってきた。

そこで、2種類の睡眠間におけるゆらぎの遷移現象を解釈するために、Hopfield型の相互結合型神経回路網モデルによるシミュレーションを試みた。このモデルは、調節神経系からの入力を模擬した大域的な抑制入力と、それとは独立なランダムノイズ入力を持っている。このとき、シナプス加重は連想記憶と同様にメモリパターンの相関行列として与えた。メモリの埋め込みは、あくまでもできあがったモデルのアトラクタの構造を制御するためのものである。

ランダム入力の振幅の標準偏差を一定にしておき、大域的抑制入力を大きくすると、状態遷移時系列は、白色雑音様スペクトルを示す。ところが抑制入力を小さくすると、 $1/f$ 様のスペクトルを示すようになる。この結果から、徐波睡眠時には調節神経系入力によるバイアスが抑制側にシフトすることにより、単一ニューロンの発射頻度が下がり白色雑音様のスペクトルを示すのに対し、レム睡眠時には抑制バイアスが緩和されることにより、ニューロン間の相互作用が顕在化し、ニューロン活動に $1/f$ ゆらぎが生じるようになるものと推測される。状態空間での振る舞いの解析から、弱抑制状態では、モデルはノイズの摂動を受けながらいくつかの局所的な平衡点(準安定平衡点)の間を間欠的に移動していることがわかった。しかもその滞在時間は平衡点によって異なった分布を有することから、様々な長さで各ニューロンの状態が維持され、その系列が混合されて出現することになる。これは特徴的なタイムスケールを持たないという $1/f$ ゆらぎの一つの側面に対応している。一方、強抑制状態では、回路網からの入力よりも大域的な抑制入力の方が優位となり(つまりゼロ状態の吸引力が増し)、個々のニューロンの膜電位が閾値を越えるのは、ノイズによる場合だけとなり、ランダムな活動を呈するものと考えられる。ダイナミクスの遷移現象は、ノイズの相関や結合の疎密によっても引き起こされることが明らかになり、条件はさらに一般化された。

脳単一ニューロン活動の $1/f$ ゆらぎ現象が上述のような神経回路網モデルによって説明されたことから、次のような描像が示唆される。すなわち、少数の $1/f$ ゆらぎするソースが回路網内のどこかにあるというのではなく、多くの非線形な要素が互いに相互作用しており、これへ擾乱が加わることにより $1/f$ ゆらぎが生じているというものである。

この研究は、その成果をまとめた論文(Neural Networks, vol.10, 1289-1302, 1997)が平成10年度日本睡眠学会研究奨励賞(中尾光之助教授)を受賞するなど、国内外を通じて高い評価を受けている。