

3次元セルオートマトンを用いた神経細胞群同期シミュレーション Simulation of Neuronal Group Synchronizations with 3D cellular automata

池田 翔†
Sho Ikeda

1. はじめに

脳内で生じる神経細胞の発火の同期現象は、脳活動の分析等に役立ち、近年注目されている^[1]。先行研究で脳の同期シミュレーションがある^[2]が、計算コスト削減のためにモデルの簡易化や数値計算法として正しいと言えるものが少ない。そこで本研究では、発火の同期現象を再現する数理モデルとして、2つのスケールでモデル構築を行った。ミクروسケールとして、神経細胞間で生じる生理学的現象であるシナプス電流モデルと STDP モデルを取り入れた神経細胞の膜電位モデルを構築した。マクロスケールとして、ミクروسケールシミュレーション結果から構築したマイクロモデルとセルオートマトン構造を用いて構築した。本研究では、この2つのスケールによるマルチスケール同期シミュレーションを目的とした。Fig.1に本研究の概要図を示す。

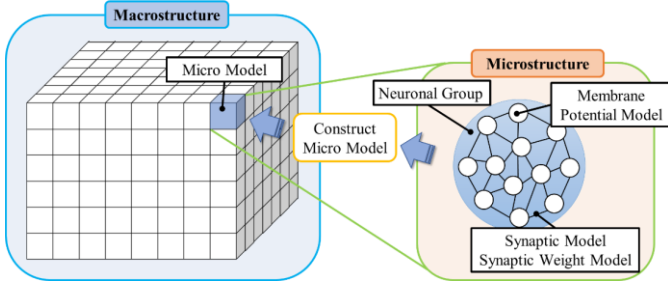


Fig.1 Outline of this study

2. ミクロモデル構築

ミクروسケールで扱うモデルを以下の式(1)~(4)に示す。

$$\begin{cases} \dot{v}_i = 0.04v_i^2 + 0.5v_i + 140 - u_i + I_{DC}^i - I_{syn}^i + sw_i \\ \dot{u}_i = a_i(b_i v_i - u_i) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{if } v_i \geq 30[\text{mV}] \text{ then } \begin{cases} v_i \leftarrow c_i \\ u_i \leftarrow u_i + d_i \end{cases} \quad (2)$$

$$I_{syn}^i = \frac{J}{N-1} \sum_{j(\neq i)}^N s_j(t)(v_i - V_{syn}^j) \quad (3)$$

$$sw_i = \frac{\eta}{N-1} \sum_{j(\neq i)}^N STDP_j^{X,Y}(t_{post} - t_{pre}) \quad (4)$$

式(1)において \dot{v}_i, \dot{u}_i をそれぞれ時間 $t[\text{msec}]$ に対する i 番目のシナプス後細胞の膜電位 $v_i[\text{mV}]$ の変化量、リカバリー変数 u_i の変化量とした^[2]。シナプス後細胞 i への外部入力項を、視床入力 I_{DC}^i 、シナプス電流 I_{syn}^i 、シナプス荷重 sw_i とした。式(2)は $v_i \geq 30[\text{mV}]$ のとき、シナプス後細胞 i の発火を意味する。パラメータ a_i, b_i, c_i, d_i で発火形状が指定できる。シナプス電流 I_{syn}^i は、シナプス前細胞 j が発火することで、シナプス後細胞 i へ流れる電流である。これは軸索の長さ依存して伝達遅延が生じる。 N を全細胞数、 J をシナプス間の結合強度、 $s_j(t)$ をシナプス前細胞 j の発火により放出さ

れる神経伝達物質がシナプス後細胞 i の樹状突起受容部へ結合する確率、 V_{syn}^j をシナプス前細胞 j の逆転電位とした。シナプス荷重 sw_i は、神経細胞間で生じるSTDPを膜電位の変化に反映させる役割を担う。STDPは、シナプス前細胞と後細胞の細胞種類と発火時間に依存して、細胞間のシナプスの結合強度を変化、保持する性質のことであり、学習や記憶、認知の機能に極めて重要な役割を担う。 t_{post} をシナプス後細胞の発火時刻、 t_{pre} をシナプス前細胞の発火時刻、 X をシナプス前細胞の種類、 Y をシナプス後細胞の種類、 η を学習倍率、 $STDP_j^{X,Y}(\Delta t)$ を XY 間のSTDP関数とした^{[3][4]}。

ミクروسケール構造は、興奮性細胞と抑制性細胞の比率4:1とした全神経細胞数100個、全結合のランダムネットワークとした。さらに各種類の神経細胞の発火率と位相差による同期判定手法を用いて、興奮性細胞と抑制性細胞との同期有無を判定した。Fig.2にミクروسケールシミュレーション結果を示す。Fig.2 A中の横軸を時間 $[\text{sec}]$ 、縦軸を細胞番号とし、点プロットは発火した神経細胞を意味する。縦軸において、 $[1,80]$ が興奮性細胞、 $[81,100]$ が抑制性細胞である。Fig.2 Bの点プロットは同期発生を意味する。

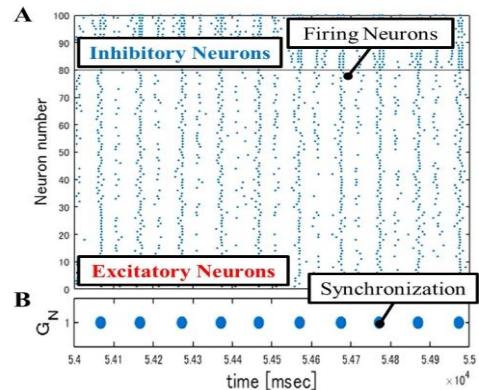


Fig.2 The result of Microscale Simulation

ミクروسケールシミュレーション結果で得られた周期的な同期現象発生時における全神経細胞の膜電位を平均化し、得られた波形に対して、フーリエ級数を用い、マイクロモデルの波形を構築した。セルオートマトン構造では、1つのセルを1つのマイクロモデルとし、隣接セル間モデルとして、同期発生によるマイクロモデルの位相シフト効果を導入した。式(6)(7)にマイクロモデル、位相シフトモデルを示す。

$$V_i(t) = a_0 + \sum_{n=1}^3 [a_n \cos\{n(\omega t - \phi_i)\} + b_n \sin\{n(\omega t - \phi_i)\}] \quad (5)$$

$$\phi_i = \frac{K}{N_i} \sum_{m=1}^{N_i} H_m(V_j^m - V_i) \quad (6)$$

† 同志社大学大学院生命医科学研究科 Graduate School of Life & Medical Sciences, Doshisha University

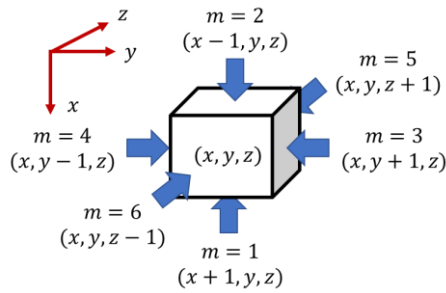


Fig.3 Outline of phase shift model between cells

式(5)において $V_i(t)$ を i 番目のセルにおける時間 t [msec] の膜電位 [mV], a_0, a_n, b_n, ω を関数パラメータとした. Fig.3 に位相シフトモデルの概要図を示す. 式(6)の K を結合強度, N_i を i 番目のセルに隣接するセル数, m を隣接するセルの座標番号, V_j^m を m 番目の隣接するセル j の膜電位とした. 同期判定 H_m を同期発生有 ($H_m = 1$), 同期発生無 ($H_m = 0$) とした. Fig.4 にマイクロモデルの電位波形を示す. Fig.4 の最大ピーク値が Fig.2 B の同期発生に相当する.

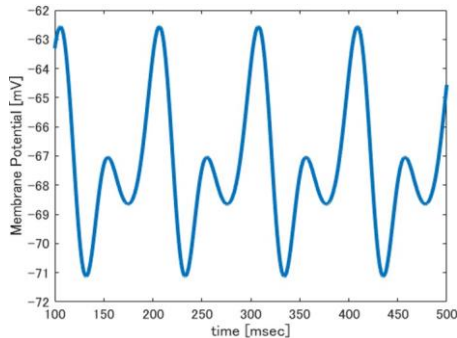


Fig.4 Potential waveform of micro model

3. マクروسケールシミュレーション実験

マクروسケール構造は, 一辺が 100 個のセルのような立方体配列とし, 近傍条件は, 2 次元のムーア近傍を 3 次元に拡張した 26 近傍を採用したため, $N_i = 6$ とした. 立方体の境界条件は, 周期境界条件とした. 本研究の実験では, 十分時間が経過した状態での式(6)の結合強度 $K = 0.5, 1.0, 1.5$ の同期発火するセル数の変化を調査した.

4. 結果と考察

シミュレーション結果を Fig.5 示す.

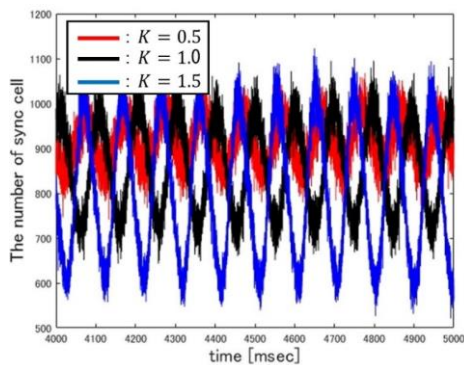


Fig.5 The number of synchronic cells

Fig.5 の結果から, 結合強度 K が大きければ, 振幅が大きくなることがわかる. このことから結合強度 K は, ゲインの役割を担っていることが分かる. 次に, 波形の周波数に着目した. そこで Fig.4 と Fig.5 の結果にウェーブレット変換を用いて時間周波数解析を行った. その結果を Fig.6 (左図: Fig.4, 右図: Fig.5 ($K = 1.0$)) に示す. 結合強度 $K = 0.5, 1.5$ の場合でも同様の結果が得られた.

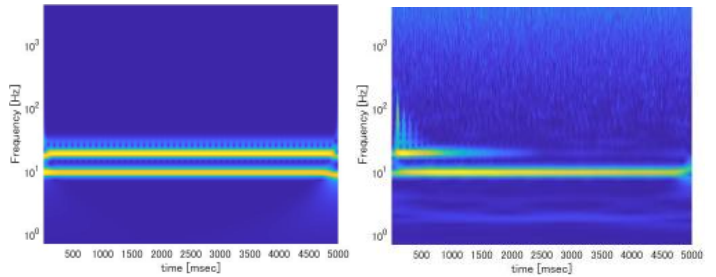


Fig.6 Time - Frequency analysis in Fig.4 and Fig.5

Fig.6 の左図において, 2 つの特徴的な周波数帯域が見られる. これはマイクロモデルが 2 重周期関数であり, 倍周期が存在するためである. ここで Fig.4 の最大ピーク値が同期発生に相当することから, 構築したマイクロモデルの同期周波数は 10 [Hz] となる. Fig.6 の右図において, 初期状態ではマイクロモデルと同様の 2 つの周波数帯域が見られたが, 十分時間が経過すると 10 [Hz] の周波数に収束していることが分かる. 以上のことから膜電位モデルからなるミクロスケールと構築したマイクロモデルとセルオートマトン構造からなるマクروسケールでの同期周波数が一致していることが分かる. したがって, 本研究でミクロとマクロのマルチスケール同期シミュレーションができた.

5. おわりに

本研究では, 膜電位モデルから得られた同期現象をマイクロモデルとして構築し, ミクロモデルとセルオートマトン構造を用いてマクروسケールシミュレーションを行った. 結果, 両スケールで同様の同期現象が現れたことから, マルチスケール同期シミュレーションができた. 今後の展望として, 任意の領域での強制的な同期発生や任意の境界面を吸収境界条件への変更を行い, 同期発火セル数や空間分布の変化を調べていく. さらに, 本研究では 10 [Hz] のマイクロモデルを構築したが, 式(5)中の関数パラメータを変え, 様々な周波数を持つマイクロモデルの構築を目指す. これにより, より汎用性の高いマルチスケール同期シミュレーションの実現が可能となり, 脳機能の解明に貢献できると考えられる.

参考文献

- [1] Sadeem N. Kbah, A Computational Model of the Brain Cortex and Its Synchronization, BioMed Research International, (2020)
- [2] E.M. Izhikevich, Polychronization: Computation with Spikes, Neural Computation, vol. 18, no.2 (2006), pp. 245-282.
- [3] 池田翔, 各神経細胞群の同期を考慮した動態シミュレーション, 2021 年度情報処理学会関西支部 支部大会, (2021).
- [4] S.Y. Kim, W. Lim, Effect of Interpopulation Spike-Timing-Dependent Plasticity on Synchronized Rhythms in Neuronal Networks with Inhibitory and Excitatory Populations, Cognitive Neurodynamics, vol. 14, no.4 (2020), pp. 535-567.