

ニューロン間の結合強度を時間的に変化させたときの同期現象

金澤 尚人[†] 上手 洋子[†] 西尾 芳文[†]

[†] 徳島大学工学部 〒770-8506 徳島県南常三島町 2-1

E-mail: †{naoto,uwate,nishio}@ee.tokushima-u.ac.jp

あらまし 生物の脳内ではミエリン化という現象が起きており、ニューロン間の結合強度は時間的に変化する。そのため結合強度は一樣ではない。本研究では、ミエリン化に対する結合強度を時間的に変化させる方法を提案する。ヒンドマーシュ・ローズモデルは実際の生物ニューロンのようなスパイクやバーストを作り出すことができる。このモデルでの同期現象について観察する。各ニューロン間が同期するたび、その結合強度は小さくする。一方、他の結合強度は大きくする。このように少しずつ異なった結合強度に変わっていく。この提案手法をヒンドマーシュ・ローズモデルの結合系に適用し、同期の達成への効果について調べる。

キーワード ニューロン, 同期, 結合強度, ヒンドマーシュ・ローズモデル

Investigation of synchronization under temporal evolution of coupling strength

Naoto KANAZAWA[†], Yoko UWATE[†], and Yoshifumi NISHIO[†]

[†] Faculty of Engineering, Tokushima University 2-1 Minami-josanjima, Tokushima, 770-8506 Japan

E-mail: †{naoto,uwate,nishio}@ee.tokushima-u.ac.jp

Abstract In this study, we observe synchronization on Hindmarsh Rose model which produce spiking-bursting behavior like real biological neurons. There is phenomenon called Myelination. We have unequal coupling strengths to temporal evolution them in our brain. We propose the way to temporal evolution of coupling strength. The coupling strength is weakened every synchronization. On the one hand, other coupling strengths are enhanced. We investigate the effect to achieving synchronization of Hindmarsh Rose model with this proposed method.

Key words neuron, synchronization, coupling strength, Hindmarsh Rose

1. ま え が き

我々の脳内には無数のニューロンが存在する。ニューロンは多数の入力部分と1つの出力部分で構成される。脳内ではそのニューロンたちが結合し、神経回路を形成している。その神経回路を数学モデル化し、脳内で起こる特徴をコンピュータ上でシミュレーションを行うことができるものがニューラルネットワークである。高次元の力学系を持ったスパイクやバーストを観察することができる。軟体動物でのニューロンの動き [1] やスパイク、バーストの動き [2]、ヒンドマーシュ・ローズモデルにおけるニューロンの振る舞い [3]、結合方法による違いなど [4]、ニューラルネットワークの基礎研究は注目がされている。このネットワークは非常に複雑に形成されている。ニューロン間の結合の強さは結合強度と呼ばれている。結合強度は電気信号によって強くなり、つまり情報伝達を行うことで強くなる。ニューロンの出力部分と軸索と呼ばれる。一部の軸索は髄鞘にオリゴデンドロサイトが覆っている。オリゴデンドロサイトは脂質の多い白い物質である。覆われた軸索は覆われた軸索

よりも情報伝達を早く行うことができると報告されている。この現象はミエリン化と呼ばれる。例えば、何か新しいことを始めた時、達成するために練習に励むだろう。新たな挑戦を達成することができるのは脳内でミエリン化が起きているからである。これより、学習とミエリン化との間には大きな関係があることがわかる。ミエリン化の研究は学習での応用において性能がより良くなると期待されている。

本研究では、ミエリン化に対する結合強度を時間的に変化させる方法を提案する。各ニューロン間が同期するたび、その結合強度は小さくする。一方、他の結合強度は大きくする。このように少しずつ異なった結合強度に変わっていく。提案手法を実際の生物ニューロンのようなスパイクやバーストを作り出すヒンドマーシュ・ローズモデルに適用し、完全同期になるまでの時間を観察した。また、結合強度を時間的に変化させた場合の影響や効果についても調査する。

2. ヒンドマーシュ・ローズモデル

ヒンドマーシュ・ローズ (HR) モデルは軟体動物のニューロ

ンで起こるカオス的振る舞いを数学モデルで再現したものである。このモデルは外部からの刺激が常時なくても自動的にカオス的振る舞いを引き起こすことができる。パラメータを設定することで様々な発振を見ることができる。

2.1 単体ニューロン

このモデルは3つの変数を持っている。ニューロンの膜電位を示す $x(t)$ ，補助変数でカリウムとナトリウムを運ぶための速いイオンチャンネルの集合を表す $y(t)$ ，遅い変数で他のイオンチャンネルにおける力学系を捕える $z(t)$ である。HR モデルは次の式のように表される。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = y(t) - ax^3(t) + bx^2(t) - z(t) + I \\ \dot{y}(t) = c - dx^2(t) - y(t) \\ \dot{z}(t) = -rz(t) + rS(x(t) - c_x) \end{cases} \quad (1)$$

パラメータを $a = 1$ ， $b = 3$ ， $c = 1$ ， $d = 5$ と設定する。本研究では，入力電流 $I = 3.281$ ，電圧 $c_x = -1.6$ ，遅い力学系における膜電位が起こす影響の大きさ $S = 4.0$ ，遅い電流のタイムスケール $r = 0.0021$ とする。これらの微分方程式はルンゲクッタ法を用いて解く。図1は単体ニューロンの膜電位の時間的変化の波形の一例である。

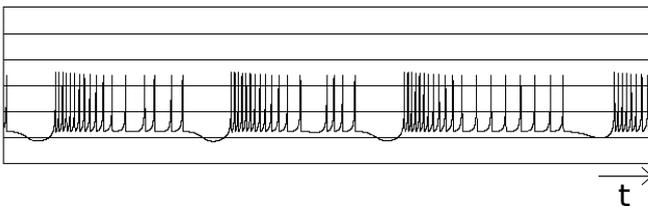


図1 HR モデルにおける単体ニューロンの膜電位の時間的変化。

2.2 電気結合

本研究では，図2で示したように5つのニューロンでの完全結合モデルを使用した。電気結合を用いた式は次のように示される。

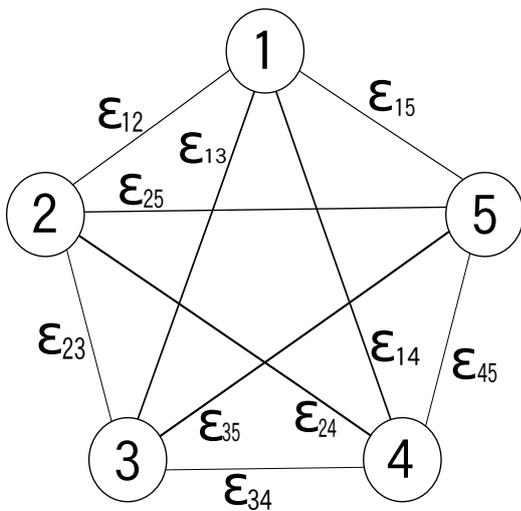


図2 5つのニューロンでの完全結合モデル。

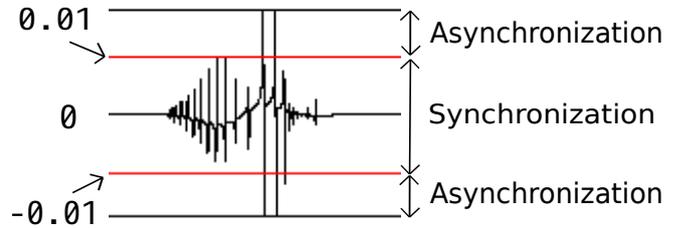


図3 同期状態の定義。

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = y_i(t) - ax_i^3(t) + bx_i^2(t) - z_i(t) + I - K_i \\ \dot{y}_i(t) = c - dx_i^2(t) - y_i(t) \\ \dot{z}_i(t) = -rz_i(t) + rS(x_i(t) - c_x) \end{cases} \quad (2)$$

ここで i はニューロン番号 (1 から 5) を示している。関数 K_i は次のように示す。

$$\begin{cases} K_1 = \varepsilon_{12}(x_1 - x_2) + \varepsilon_{13}(x_1 - x_3) \\ \quad \quad \quad + \varepsilon_{14}(x_1 - x_4) + \varepsilon_{15}(x_1 - x_5) \\ K_2 = \varepsilon_{12}(x_2 - x_1) + \varepsilon_{23}(x_2 - x_3) \\ \quad \quad \quad + \varepsilon_{24}(x_2 - x_4) + \varepsilon_{25}(x_2 - x_5) \\ K_3 = \varepsilon_{13}(x_3 - x_1) + \varepsilon_{23}(x_3 - x_2) \\ \quad \quad \quad + \varepsilon_{34}(x_3 - x_4) + \varepsilon_{35}(x_3 - x_5) \\ K_4 = \varepsilon_{14}(x_4 - x_1) + \varepsilon_{24}(x_4 - x_2) \\ \quad \quad \quad + \varepsilon_{34}(x_4 - x_3) + \varepsilon_{45}(x_4 - x_5) \\ K_5 = \varepsilon_{15}(x_5 - x_1) + \varepsilon_{25}(x_5 - x_2) \\ \quad \quad \quad + \varepsilon_{35}(x_5 - x_3) + \varepsilon_{45}(x_5 - x_4) \end{cases} \quad (3)$$

ここでパラメータ ε は結合強度である。

3. 提案手法

初めに，同期状態の定義を次の式で表す。

$$|x_a - x_b| < 0.01 \quad (4)$$

ここで x_a, x_b はニューロンの膜電位を表す。2つニューロンの膜電位の差が 0.01 よりも小さいと同期とする。図3は同期の定義を表す。ステップサイズは $h = 0.05$ に設定した場合，単ニューロンの1周期分の平均は 5066 イタレーションであることがわかった。つまり， $t = 253.3$ である。これより， $t = 253.3$ 間常に同期状態を保てればそのニューロン間は同期したと判断することとする。結合強度の変化方法について説明する。結合強度はニューロン間が同期すれば m ずつ小さくする。その後，他の結合強度を $m/9$ ずつ大きくする。これはニューロン間が同期するたびに行われる。もし全ニューロン間が同期しなかった場合， $t = 100000$ まででシミュレーションは終了することとする。

4. シミュレーション結果

4.1 結合強度の変化なし

このシミュレーションでは，毎回ランダムな初期値を用いている。全ての結合強度は $\varepsilon_{ij} = 0.2$ と設定する。シミュレーション結果から3つの同期型が現れた。完全同期型，3-2同期型，2-2-1同期型である。3つの同期型は図4で表す。シミュレ

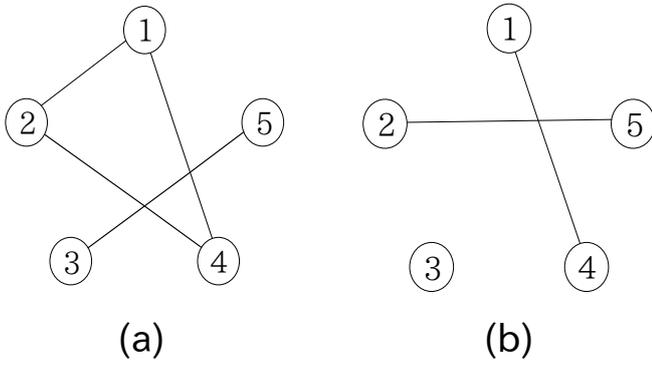


図4 分離した同期型. 実線はニューロン間の同期を示す. (a)3-2 同期型 (b)2-2-1 同期型

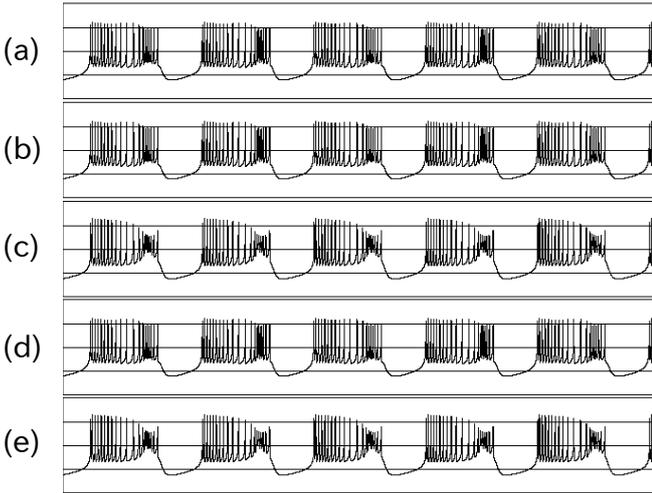


図5 結合強度変化なしにおける膜電位の時間変化. (a) ニューロン 1. (b) ニューロン 2. (c) ニューロン 3. (d) ニューロン 4. (e) ニューロン 5.

シミュレーション中にこれらの同期型が何度か現れることもある。シミュレーションは完全同期が現れる場合または $t = 100000$ まで実行する。図5はニューロンの膜電位による時間変化を表す。図6はニューロン間の波形の差異を表す。これらのシミュレーション結果は図4(a)を示す。また図6(a), (c), (f), (i) からニューロン間が同期していることが確認できる。これより、図4(a)と同じ分離した同期型を示されていることがわかる。この同期型は全結合強度を $\varepsilon_{ij} = 0.2$ で設定した時、 $t \approx 9608.5$ で現れた。

4.2 結合強度の変化あり

このシミュレーションでも、毎回ランダムな初期値を用いている。全ての結合強度は初め、 $\varepsilon_{ij} = 0.2$ と設定する。本研究では、 $m = 0.005, 0.001, 0.0003$ と設定した時のシミュレーション結果を示す。

図7は $t \approx 7500$ 周辺での膜電位の時間変化を表す。図8は $t \approx 7500$ 周辺での各ニューロン間の波形の差異を表す。図7, 8は $m = 0.001$ の時のシミュレーション結果である。これらの結果は図4の状態と同じである。この同期型になるまでに $t = 7001.05$ かかった。つまり、結合強度の変化ありにおける今回の同期型は変化なしの結果よりも早く達成することがわかる。

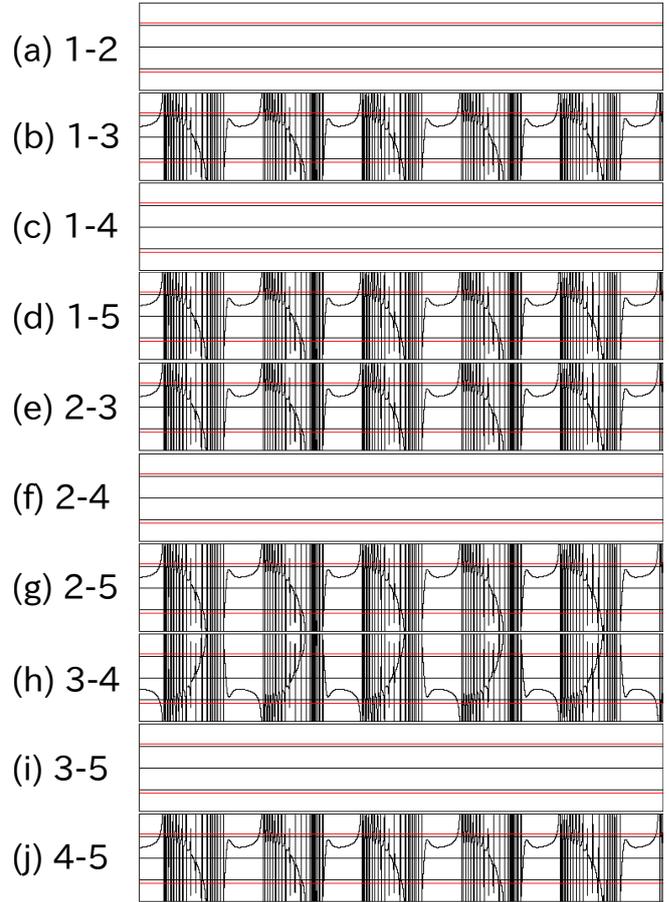


図6 結合強度変化なしにおけるニューロン間の波形の差異. (3-2 同期型)

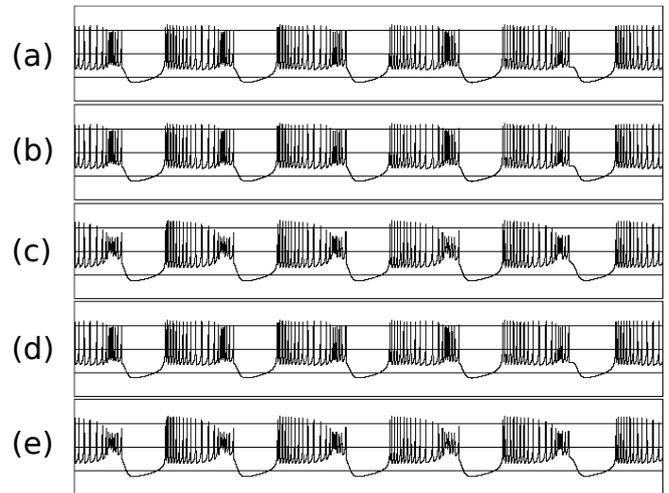


図7 結合強度変化ありにおける $t \approx 7500$ 周辺での膜電位の時間変化. (a) ニューロン 1. (b) ニューロン 2. (c) ニューロン 3. (d) ニューロン 4. (e) ニューロン 5.

しばらくすると、図9, 10を得た。図9は膜電位の時間変化を表す。図10は各ニューロン間の波形の差異を表す。図10の結果より、全てのニューロン間が同期状態になっていることがわかる。この完全同期型は $t = 15541.25$ で完成した。

表1はそれぞれのシミュレーション結果を示す。我々は3-2同期型, 2-2-1同期型, 完全同期型の3つの同期型になるまで

表 1 それぞれのシミュレーション結果. 各同期型の出現確率と出現するまでの時間.

		完全同期型		3-2 同期型		2-2-1 同期型	
		t	Probability	t	Probability	t	Probability
Non-Change		9766.51	61%	6798.72	86%	4607.63	100%
Change	0.005	18468.14	72%	13480.74	91%	6432.07	97%
	0.001	12632.63	100%	5845.69	100%	4349.01	100%
	0.0003	11467.45	100%	6772.48	100%	4599.11	100%

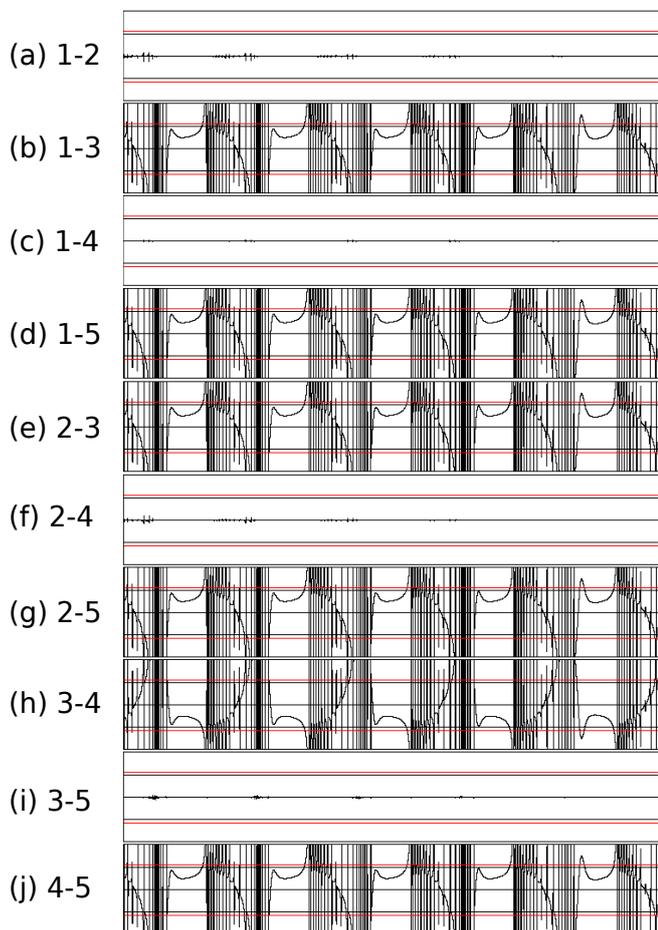


図 8 $t \approx 7500$ 周辺でのニューロン間の波形の差異. (3-2 同期型)

の時間を記録した. それぞれのパラメータでの結果はそれぞれ 100 回ずつシミュレーションを行った. この表から各同期型の出現確率と出現するまでにかかった時間を確認することができる.

図 11 は同期型が現れるまでにかかった時間をそれぞれの結果ごとにまとめた図である. 表 1 と図 11 を見てわかるように, 結合強度変化なしは変化ありの結果よりも早い時間で完全同期型になることがわかる. しかし, 全ニューロンが同期する確率は変化ありの方が高い確率を示す. また, 結合強度の変化量が小さい方が完全同期型になるまでが早いこともわかる.

5. ま と め

本研究では, ヒンドマーシュ・ローズモデルでの 5 つのニューロンにおける完全結合の同期を観察した. 結合強度を変化しな

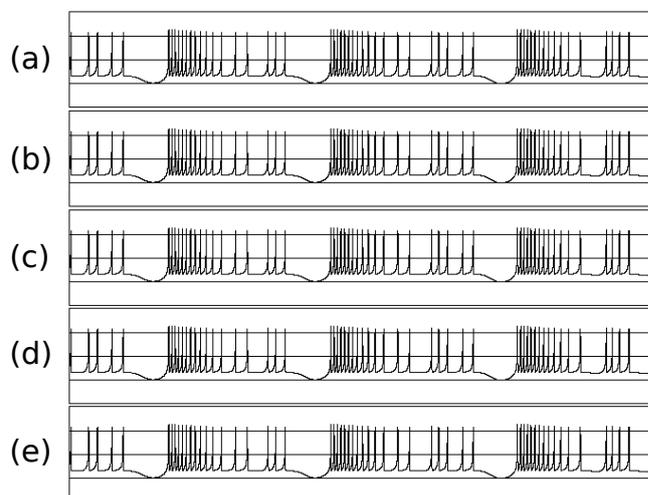


図 9 結合強度変化ありにおける $t \approx 15541.25$ 周辺での膜電位の時間変化. (a) ニューロン 1. (b) ニューロン 2. (c) ニューロン 3. (d) ニューロン 4. (e) ニューロン 5.

い場合, 結合強度を変化させた時と比べて完全同期型になるまでが早い. しかし, 結合強度変化ありの場合は完全同期になる確率が高いことがわかる. また, 結合強度の変化量においては変化量が小さい方がそれぞれの同期型になるまでが早いこともわかる. 今回提案した方法を用いることで, 完全同期になる確率を高めることができることを確認した. 将来, 今回よりも大規模のモデルを構築し, さらに神経回路に近いものでシミュレーションを行う.

文 献

- [1] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley, "A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve," *J. Physiol.*, vol. 117, No. 4, pp. 500-544, Aug. 1952.
- [2] A. L. Shilnikov and N. F. Rulkov, "Origin of chaos in a two-dimensional map modeling spiking-bursting neural activity," *Int. J. Bifurcation and Chaos*, vol. 13, No. 11, pp. 3325-3340, 2003.
- [3] J. L. Hindmarsh and R. M. Rose, "A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations," *Proc R Soc Lond B Biol Sci.*, vol. 221, No. 1222, pp. 87-102, Mar. 1984.
- [4] Henry D. I. Abarbanel, R. Hueta, M. I. Rabinovich, N. F. Rulkov, P. F. Rowat and A. I. Selverston, "Synchronized Action of Synaptically Coupled Chaotic Model Neurons: I. Simulations Using Model Neurons," *Neural Computation*, Vol. 8, No. 8, pp. 1567-1602, Nov. 1996.

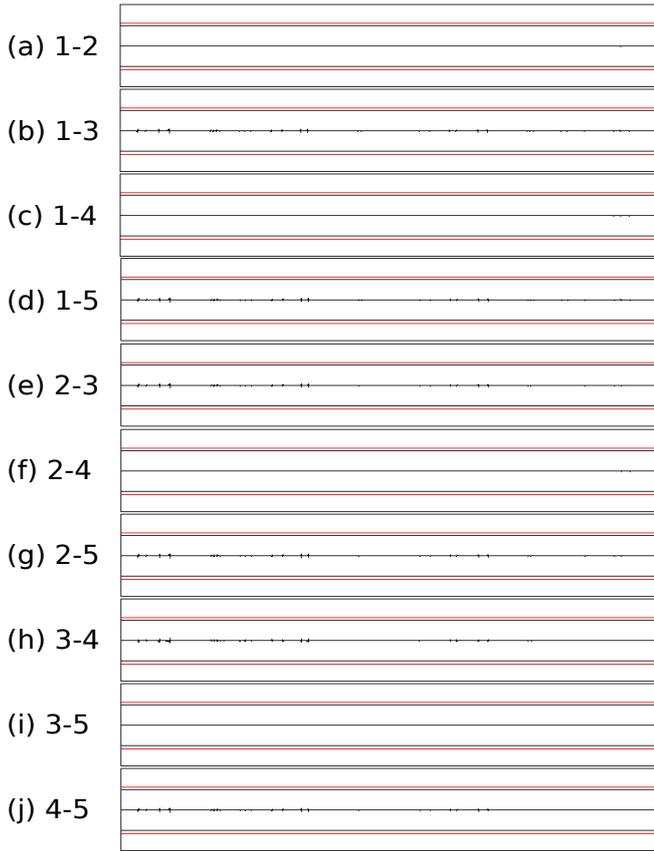


図 10 $t \simeq 15541.25$ 周辺でのニューロン間の波形の差異.

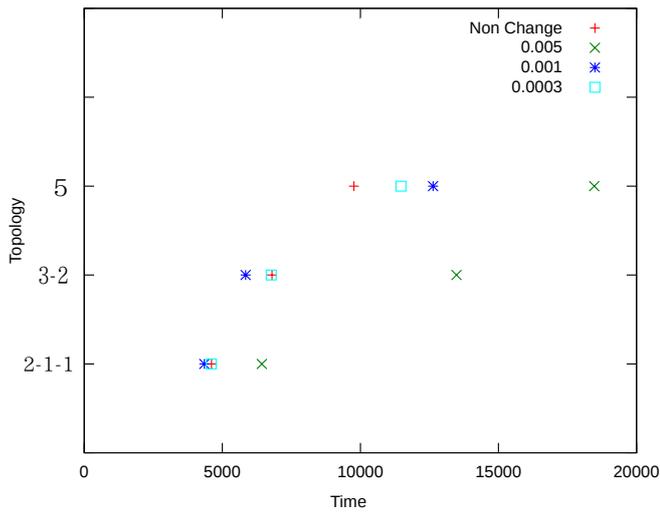


図 11 それぞれの同期型が出現するまでの時間. 十字印: 結合強度変化なし. X マーク: $m = 0.005$. アスタリスク: $m = 0.001$. 四角形: $m = 0.0003$.