

琉球大学学術リポジトリ

任意に接続されたEPSPのみからなるニューロン回路の閾値と発火状態との関係－電子計算機によるシミュレーション－

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学理工学部 公開日: 2013-10-02 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山城, 毅, Yamashiro, Tsuyoshi メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/26603

任意に接続された EPSPのみからなるニューロン回路 の閾値と発火状態との関係

—電子計算機によるシミュレーション—

山 城 毅*

Relation between threshold and firing phenomena of neuron circuits, considering only EPSP, which are randomly connected.

—Computer simulation—

Tsuyoshi Yamashiro

Abstract

In this model, each neuron has four excitatory outputs and is randomly connected with other neurons. When the neuron fires, it sends out four excitatory signals, and it stimulates other four neurons (include itself). In the next time, other neurons fire when its' membrane potential exceed the values of its' threshold. In this way these circuits repeat firing. The values of threshold are decided artificially. This paper denotes an effect of the relation between threshold and firing phenomena.

I まえがき

高度の情報処理機能をもつシステムの開発には、人間の認識のメカニズムの解明が最大の要素の一つとなるであろう。人間の認識については、心理学的な面からの仮説と生理学側からの研究がなされている。心理学的な問題は、工学では、計算機によるシミュレーション等をする場合に、特に必要はないので、生理学的な面から考えてみる。

人間の脳細胞の数(約140億個)については、出生後は分裂増殖をいっさい行なわないという考え方¹⁾²⁾³⁾⁶⁾と、出生後1年間ぐらゐは分裂増殖をし、その後停止するという考え方があるが、いずれにしても、その後の脳細胞の数は増えることなく、死滅等によりむしろ減少⁴⁾⁵⁾している。それにもかかわらず人の成人の脳重は出生

時の約1.5倍を起えている⁴⁾⁵⁾。この増加分は、神経細胞(neuron)の成長に伴って、樹状突起(dendrite)と軸索(axon)が成長し、さらに軸索が髄鞘化¹⁾³⁾するためであると考えられている。

軸索の髄鞘化は活動電位の伝導速度に関係があり、(速くなる)、又樹状突起と軸索については、教育や訓練やすべての経験の集積により成長し、複雑につながれて多数のシナプス(Synapse)を作る。この過程が記憶に結びついていると考えられている。

個々のニューロンが果たしている役割は、樹状突起や細胞体¹⁾がそこにシナプスを作っている他の多数のニューロンや受容細胞の活動の影響を受けて、自らも活動をおこし、その結果として軸索を通じて他のニューロンに影響を及ぼすことである。本稿では、各ニューロン間に軸索が任意にシナプスを作ったときの、ニューロン群の発火状態と閾値の関係を電子計算機によ

受付:1975年4月30日

*琉球大学短期大学部電気工学科

りシミュレートし、その結果を示したものである。

II 実験モデル

シナプスには、興奮性 (excitatory postsynaptic potential, EPSP)、抑制性 (inhibitory P.P. IPSP) シナプス前抑制性 (Presynaptic inhibition, PSP) の三つがあり、又ニューロンの発火およびインパルスの伝導については不応期 (refractory period) 等があったりしてかなりむつかしくなる。又、神経回路のモデルとしては、内部構造を自分自身で変えていくような自己組織系 (Self-organizing System) のモデルとニューロン間の接続及び構造が時間的に変化しないと仮定した、固定した構造のモデルがある。前者はニューロン自体の性質の変化による回路の接続状態に重きをおき、後者では、ニューロン間の信号の伝達方法等が述べられる。ここでは後者のモデルで、ニューロン間を任意に接続し、シナプスの結合としては、EPSPのみを考えている。

まず実験モデルについて例-1で説明する。

例、1

$$N_5 = 03102 \quad N_7 = 19620$$

ニューロン N_5, N_7 の 1 桁目から 4 桁目までの数 (3102, 9620) はそれぞれ添字と同じ番号のニューロンへの接続を表わす、すなわち、 N_5 ニューロンは N_0, N_1, N_2, N_3 ニューロンへ、又 N_7 ニューロンは N_0, N_2, N_6, N_9 ニューロンへシナプスを作っていることを示す (参 Fig-1)。5桁目の数は、そのニューロンが発火しているときには1を、又静止しているときには0を割当ててある。ここでは N_5 ニューロンは静止しているので出力はなく、 N_7 ニューロンは発火して N_0, N_2, N_6, N_9 ニューロンへ興奮性のパルスを送っていることを示している。

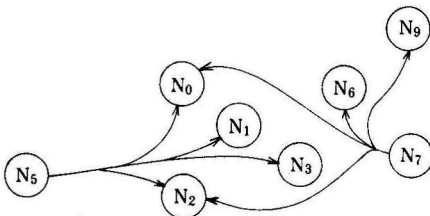


Fig.1 An example of neuron circuits.

N_i ニューロンへの発火パルスの数を K_i 個、その閾値を θ_i とすると、 $K_i \geq \theta_i$ のときに N_i ニューロンは発火し、軸索を通して他のニューロンを刺激する。これらの時間的推移により各ニューロンの発火状態を調べる。

このシミュレーションに使われたニューロンの数は $N_0 \sim N_9$ の10個で、各ニューロンより他のニューロンへシナプスを作る。軸索の分枝数は4つとし、この軸索は自分自身にフィードバックすることもあるし、同じニューロンへ2つ以上シナプスを作ることもある。ニューロン間の接続を表わす1~4桁目までの数字は乱数表より述べてある。これは、各ニューロンの樹状突起や軸索の成長による他のニューロンとの接続方法は、任意に決まると考えられるからである。こうして与えられたニューロン回路に、閾値と初期発火条件をいろいろと変えて実験を行った。

付録として、このシミュレーションのフローチャートとプログラム例、および出力の一部を記す。

III 実験結果および考案

記号および文字の説明 (x, y は整数)

Fx ; x 個のニューロンが発火 (firing) している。

$\theta = x, y$; 閾値 θ に x と y の値をそれぞれ5個のニューロンについて割当てる。 y がないのは x の値だけをすべてのニューロンに割当てる。

$M-x$; 資料ナンバー

- ; 資料の最初の発火状態
- ▲ ; 資料の最終的な発火状態
- △ ; 同数のパルスが発火しているが、発火ニューロンがちがう。(参; 付録 table-3 M-4)
- ; 前の発火状態数より発火ニューロンの数が増えた。
- ◇ ; 前の発火状態数より発火ニューロンの数が減った。

なお、図の中でこれらの記号の左側についている数字は、同数の発火パルスの連続的な繰り返し回数である。

1 9 個の異なった資料について、発火の初期状態を F_1, F_3, F_9 とし、又閾値を $\theta=1, \theta=1, 2, \theta=2, \theta=3,$

$\theta = 2, 3$ とした場合のニューロン網の発火状態の時間的推移を Fig. 2 ~ Fig. 6 に示す。

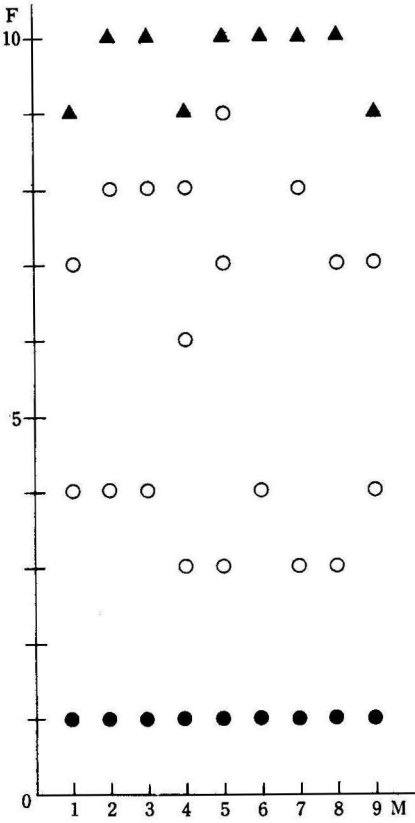


Fig. 2 Time variations of firing phenomena $\theta=1$, Each datum is different

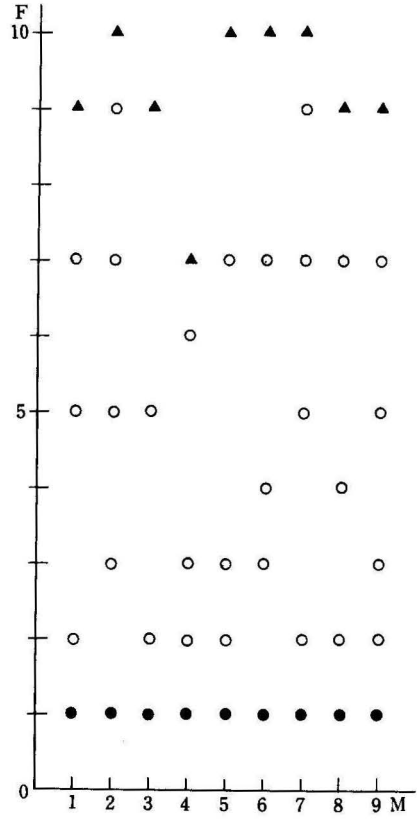


Fig. 3 Time variations of firing phenomena $\theta=1, 2$, Each datum is different

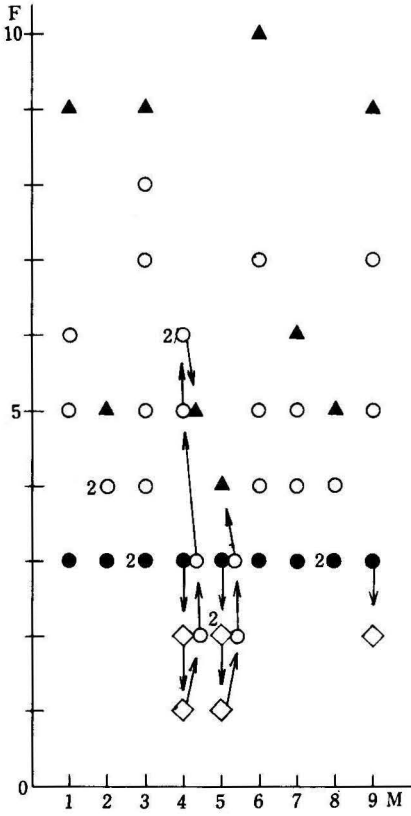


Fig. 4 Time variations of firing phenomena $\theta=2$, Each datum is different

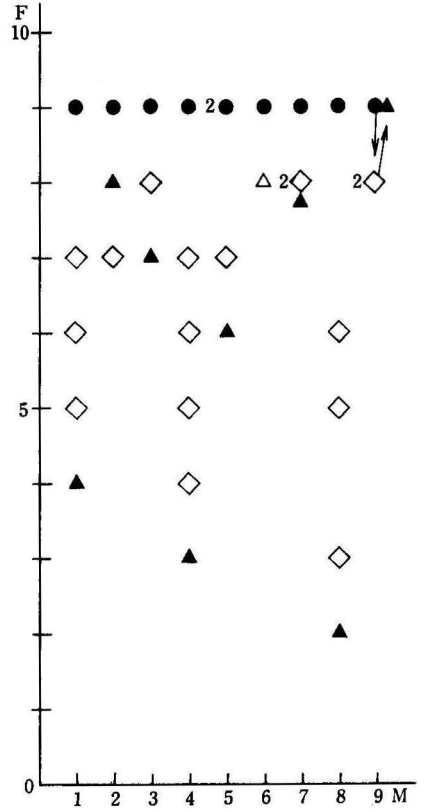


Fig. 5 Time variations of firing phenomena $\theta=2,3$ Each datum is different.

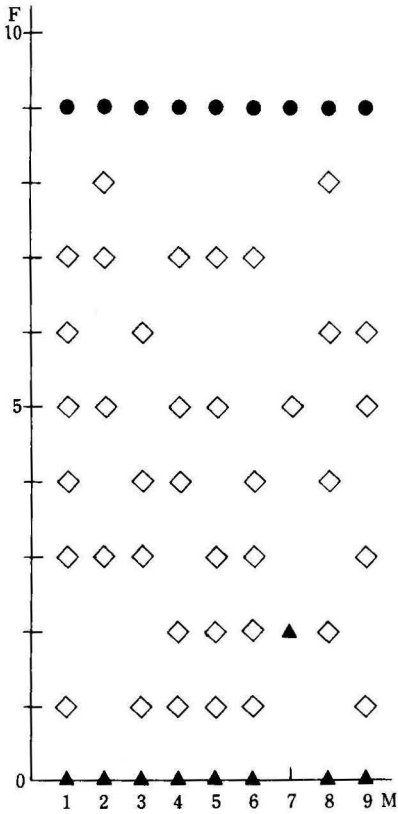


Fig. 6 Time variations of firing phenomena $\theta=3$, Each datum is different.

これらの図より、このモデルニューロン群の性質を考えると、Fig-2 と Fig-3 で最終的にほぼすべてのニューロンが発火しており、Fig-6 では逆に静止状態にもどっている。又その変化も、単に発火の数が上昇するか下降するか単純なものである。このことより、単純な刺激反応や回復等を示すようなニューロン網での閾値は $\theta=1$ 、 $\theta=1$ 、2 および $\theta=3$ と考えられる。なお、 θ の値が 4 以上では、さらに急速に静止状態にもどった。

Fig-4 と Fig-5 を見ると、最終結果としていろいろな発火状態で落ち着いており、又上昇、下降等のかなり複雑な運動があり (Fig-4, M-4, M-5)、さらにリズム運動を続ける (Fig-5, M-6) のもある。このことより、閾値 $\theta=2$ 、 $\theta=2$ 、3 のニューロン網では、かなり複雑な連想、記憶、運動リズム等の働きをする

と考えられる。ただし、 $\theta=2$ 、3 は、ここでは初期値として 9 個のニューロンが発火しているので問題があり (初期値を F_3 としたら、すべてが静止状態になった。)、 F_3 より (小数ニューロン) 発火して変化した $\theta=2$ の方に興味をもたれるので、これについてくわしく調べてみる。

2 同一ニューロン網で、その回路の特徴を調べるために、閾値 $\theta=2$ とし、初期発火状態を任意に 3 個のニューロンを取り出して得られた結果を Fig-7、Fig-8 に示す。

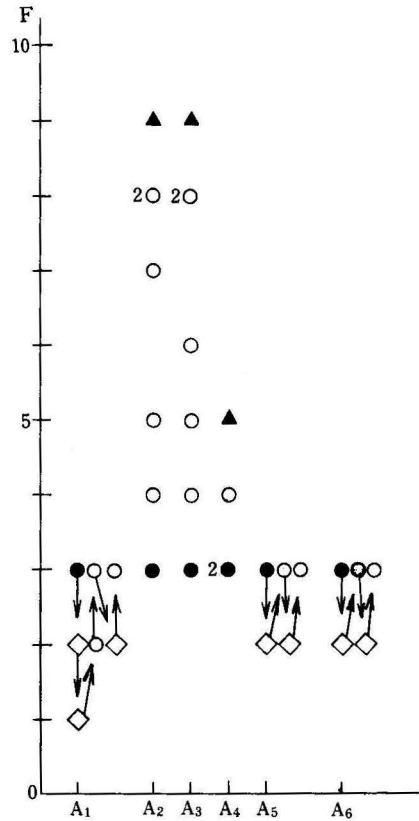


Fig. 7 Time variations of firing phenomena $\theta=2$ In the same datum, changes it's initial firing condition.

最終発火状態を示す。) この中でも資料1のAは64.6%となり、かなり高い比率でこの状態に落ち着いていることがわかる。いずれにしてもこのニューロン集団の最終結果の可能性としては、 $\sum_{r=0}^{10} C_{10,r}$ 種類と数多くあり、さらにリズム運動まで加えとかなりの数になるにもかかわらず4~5種類の少数に落ち着いているのは、このニューロン回路は、ある種の性格を示しているものとして興味があり、記憶、連想等に何らかのつながりが考えられるのではないだろうか。

これらのシミュレーションで得られたリズム運動をするような回路においては、付録table-3のM-2、M-4の出力状態を見てもわかるように、そのグループにおいて常に発火しやすいニューロンが何個もあり、それが他のニューロンのリズム運動を助けているように考えられる。付録table-3のM-2の状態を、リズム運動をしているニューロンだけを取って回路で示すとfig-9のようになる。このリズムはニューロンN₁、N₂、

IV むすび

以上、ニューロン回路の閾値と発火状態についての考察を述べてきたが、ニューロンの数が少ないことと、EPSPのみを考えたのでかなり条件が制約されている。今後の問題としてはニューロン数を増し、さらにIPSP、シナプス前抑制および不応期等をも含めて問題を発展させる必要がある。今回のシミュレーションからは次のような結果が得られた。

かっこ内は初期発火数

- 1) 閾値 $\theta = 1$ (F₁)、 $\theta = 1, 2$ (F₁) でほとんどのニューロンが発火した。
- 2) 閾値 $\theta = 3$ (F₉) でほとんどのニューロンが静止した。
- 3) 閾値 $\theta = 2$ (F₃)、 $\theta = 2, 3$ (F₉) で種々の変化が現われた。
- 4) 閾値 $\theta = 2$ (F₃) で同一資料を用いて、初期発火状態をいろいろと変化したが、ある特定の状態に落ち着くことがわかった。

以上の結果によって、本文中でも述べたように、かなり興味のある現象が得られた。

最後に御検討下さった電気工学科の諸兄に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 河内十郎；心理学—14—生理学的心理学、東京大学出版会
- 2) 時実利彦；脳の話、岩波書店
- 3) 千葉康則；脳、日本放送出版協会
- 4) 萬年、斎藤；思考過程と情報科学、産業図書
- 5) 永野 俊；“自己成長機能をもつ学習機械”、信学論 (D)、56-D、8、P-457
- 6) C.V. プルワー、磯井、渋谷沢；脳と脊髄、河出書房
- 7) 南雲仁一；バイオニクス、共立出版
- 8) 田村 博；生体のシミュレーション技術、講談社

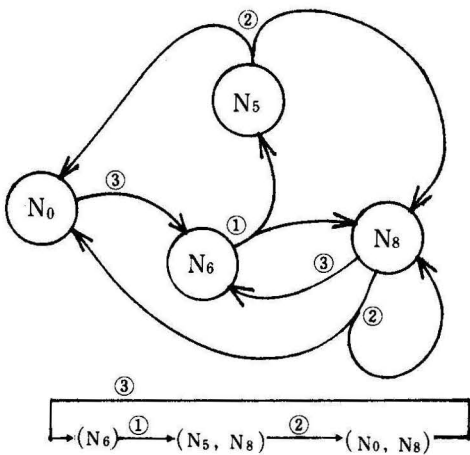


Fig. 9 Rhythmic neurons circuit

N₃が連続発火することにより、実質的にリズム運動に直接寄与しているニューロンN₀、N₅、N₆、N₈の内部構造に変化を与えていることを示している。このシミュレーションに表われるリズム運動では、単独にリズム運動をするのもあったが、ほとんどが他のニューロンの連続発火の助けを借りていた。

付 録

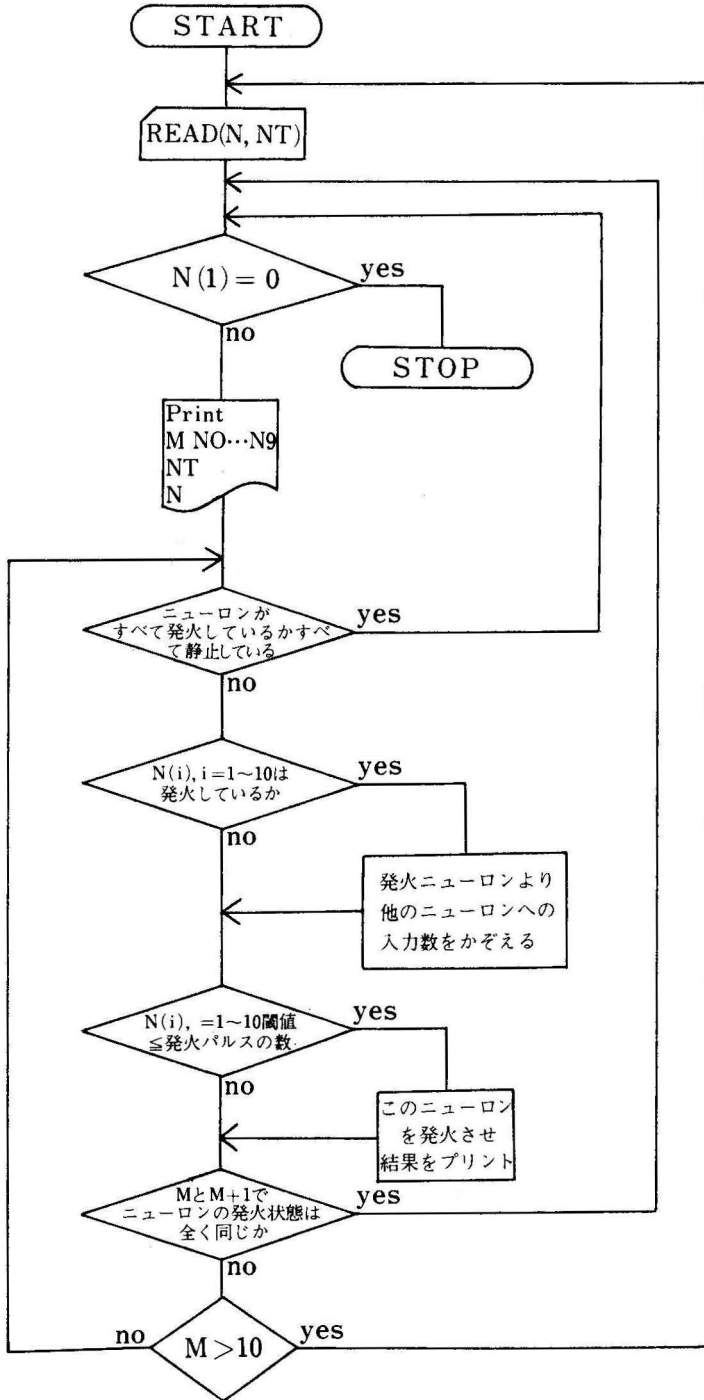


Fig. 10 Summary flow-chart of simulation program

プログラム例

C	NERVOUS FIRING PHENOMENON S500423 DIMENSION N(10), NT(10), NK(10), ION(80)
	MS=0
5	READ(5, 10) N, NT
10	FORMAT(10I5, 10I1) IF(N(1)) 15, 80, 15
15	WRITE(6, 20)
20	FORMAT(1H0, 4H M, 5H NO, 4H N1, 4H N2) 1 4H N3, 4H N4, 4H N5, 4H N6, 4H N7, 4H N8, 2 4H N9)
	MS=MS+1 WRITE(6, 7) MS
7	FORMAT(1H+, I6) WRITE(6, 8) (NT(I), 1=1, 10)
8	FORMAT(1H, 5H NT, 10I4) M=1
11	IS=1
12	IF(N(IS)-10000) 21, 13, 13
13	IF(IS=10) 14, 5, 5
14	IS=IS+1
	GO TO 12
21	IZ=1
22	IF(N(IZ)-10000) 23, 30, 30
23	IF(IZ=10) 24, 5, 5
24	IZ=IZ+1 GO TO 22
30	I=1 KP1=0 KP2=0 KQ1=0 KQ2=0 DO 110 10=1, 10
110	NK(IO)=0
40	NS=N(1)-10000
	IF(NS) 45, 100, 100
100	N(I)=NS
	NH=1000
120	J=1
130	NS=NS-NH IF(NS) 150, 140, 140
140	J=J+1 GO TO 130
150	NK(J)=NK(J)+1 NS=NS+NH
	IF(NH=1) 50, 50, 160
160	NH=NH/10

45	GO TO 120 KP1 = KP1 + 1
50	KP2 = KP2 + KP1 IF (I-10) 55, 60, 60
55	I = I + 1 GO TO 40
60	WRITE (6, 70) M
70	FORMAT (1H, 3H, T, 12)
200	K=1 IF (NT (K) - NK (K)) 210, 210, 225
210	N (K) = N (K) + 10000 L=1H*
	NL=1H NN=K*4+5
	ION (NN) = L WRITE (6, 220) ION
220	FORMAT (1H+, 80A1) ION (NN) = NL
225	GO TO 230 KQ1 = KQ1 + K
230	KQ2 = KQ2 + KQ1 IF (K-10) 240, 250, 250
240	K=K+1 GO TO 200
250	IF (KP1-KQ1) 255, 245, 255
245	IF (KP2-KQ2) 255, 5, 225
255	M=M+1 IF (M-10) 11, 11, 5
80	STOP END

Table-3 Examples of neuron firing phenomea

	M-1	N0	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
	NT	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T 1						*		*		*	
T 2							*			*	
T 3			*								
T 4					*						
T 5				*							
T 6											

	M-2	N0	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
	NT	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T 1			*				*	*			
T 2			*		*		*			*	
T 3		*	*	*	*						

T 4			*	*	*			*			
T 5			*	*	*			*			*
T 6		*	*	*	*						*
T 7			*	*	*			*			
T 8			*	*	*			*			*
T 9		*	*	*	*						*
T 10			*	*	*			*			
	M-3	N0	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
	NT	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T 1								*	*		*
T 2			*					*			*
T 3			*	*	*						
T 4			*	*	*						
	M-4	N0	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
	NT	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T 1		*		*				*			*
T 2		*	*			*		*	*		*
T 3		*		*		*	*	*		*	*
T 4		*	*			*	*	*	*		*
T 5		*		*		*	*	*		*	*
T 6		*	*			*	*	*	*		*
T 7		*		*		*	*	*		*	*
T 8		*	*			*	*	*	*		*
T 9		*		*		*	*	*		*	*
T 10		*	*			*	*	*	*		*
	M-5	N0	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
	NT	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T 1		*	*	*				*	*	*	*
T 2		*	*	*				*		*	
T 3			*					*		*	
T 4			*					*			
T 5			*								
T 6											
	M-6	N0	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
	NT	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T 1								*	*	*	*
T 2		*	*						*	*	*
T 3			*	*	*			*	*	*	*
T 4		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Table-3 の発火状態の説明

ている。

M-1、M-5；T6（6回の繰り返し）で静止状態になっ

M-2；fig-9で説明したように、リズム運動をしている。

M-3 ; T3 で N_1 、 N_2 、 N_3 の発火状態に落ち着く。

M-4 ; N_0 、 N_4 、 N_5 、 N_6 、 N_9 の各ニューロンの連続発火のもとで、 (N_1, N_7) (N_2, N_8) のリズム運動をしている。

M-6 ; すべてのニューロンが発火している。