

Neutomime について

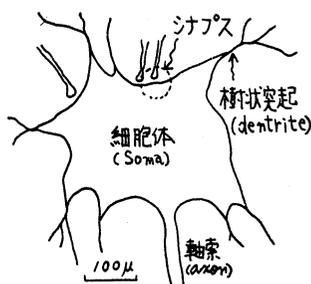
村 井 忠 邦
八 木 寛

TADAKUNI MURAI HIROSHI YAGI

Recently, a superior function of the lives has been recognized, and the enineering application of this biological function has become prospered. This article discribes the gelectronic neuron model. Neuron, a basic unit of nervous system, has a characteristics of threshold and refractorinesetc, and closely relates to information processing. This neuron model (called Neutomime), we created, has a good agreement with a practical neuron characteristics.

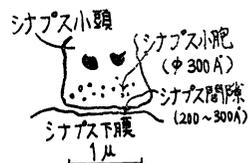
1. はじめに

近年、生体の持つすぐれた機能が注目をあび、これを工学的に活用しようとする気運が非常に高くなってきている。本研究は、これらの一環として、情報処理の面からみた神経系を取り上げ、その基礎的な単位をなすニューロンの電子回路モデルを作製したものである。ニューロンについては、過去、幾多の実験による生理学的検討がなされてきており、それと同時に、いくつかの数学モデルや電子回路モデルも報告されてきている。反面、これらの研究は、解明されていない点が非常に多く、ニューロンの情報処理機能についての性質の一部が明らかにされているだけである。筆者等の作製したニューロンの電子回路モデル (Neutomime と呼ぶ。) も、この観点から、初期の域を脱しきれないが、閾値作用、不応期など、特に情報処理において重要と思われる機能に注目してモデルを作製した。実験の結果、実際のニューロンの入出力特性にかなり一致したものが得られたので報告する。



2. ニューロンの構造と一般的性質

ニューロンの一般的な形態を図-1に示す。神経線維は、その末端が分岐し、他の神経 (ニューロン) に接合されているが普通、線維の先端 (シナプス前部) と、細胞体の表面 (シナプス後部) とは、 $200\sim 300\text{\AA}$ の間隙があるといわれている。(図-2, 3)。ニューロ



ンにおける情報処理は次のようになされている。まず、信号がシナプス前部に到達すると、シナプス小頭内のシナプス小胞から、アセチルコリンなどの化学物質が、この間隙に向かって放出され、その結果、シナプス後部には、シナプス後電位 (PSP) と呼ばれる電位変化を生ずる。このPSPには、興奮性シナプス後電位 (EPSP) と抑制性シナプス後電位 (IPSP) の2種があり、このいずれが発生するかは、シナプス自身の興奮性、抑制性によるといわれている。

これらの電位は細胞内で局所的に発生し、この電位の和が、一定の値 (閾値) を越すと、細胞体の末端部付近で興奮が発火しスパイクを生ずる。この電位がニューロンの活動電位であり、軸索部分を通過して、次段のニューロンの入力となる。いったん、ニューロンのスパイクが発生すると、ある期間、どのような刺激に対しても応じない絶対不応期があり、その後、相対

不応期と呼ばれる閾値の時間的変化が続いた後、やがて正常な閾値に復元するようになる。

また、単一のニューロンには無数のシナプス結合が存在し、これらのシナプスによる空間的加重、あるいは単一シナプスからの刺激の時間的加重によって、これらのスパイク電位が発生し複雑な情報処理を行っていると考えられている。図-4~7に、運動ニューロ

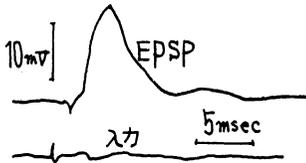


図-4 EPSP

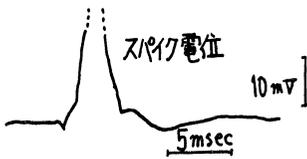


図-5 スパイク電位

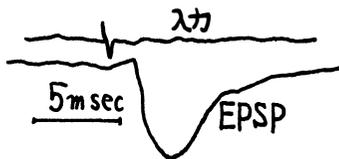


図-6 IPSP

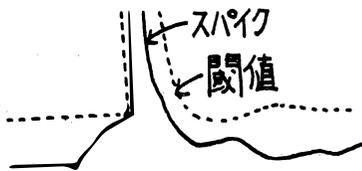


図-7 スパイク発生による閾値の時間的変化

ンにおけるEPSP, IPSP電位, 閾値の変化の例を図示した。さらに、この他、一定の刺激が長時間継続すると、スパイク出力頻度が次第に減少する順応や、ゆっくりと増加する刺激に対して、閾値を越えても発火しない適応などの性質をも持っている。これらを含めたニューロンの性質を列挙すると次のようになる。

- (a) 一方向性伝送
- (b) 多入力一出力

- (c) 興奮性, 抑制性の2種の結合
- (d) 空間的加重
- (e) 時間的加重
- (f) 閾値作用
- (g) 絶対不応期
- (h) 相対不応期
- (i) シナプス遅延
- (j) パルスの発生
- (k) 促進と反促進
- (l) 順応と適応
- (m) 波型整形作用
- (n) シナプス前部抑制
- (o) 後電位

3. Neutomime の動作

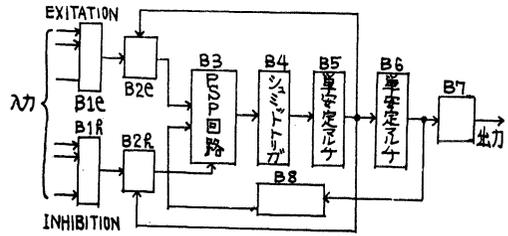


図-8 Neutomime ブロック線図

図-8にNeutomimeのブロック線図を、図-9に回路を示した。入力端子は興奮性入力端子B1・e, 抑制性入力端子B1・hに分けた。まず図-10に示した入力興奮性入力端子から入ると、B2・e通過後B3で積分される。この積分されたB3出力がシナプス後電位に対応している。B4はシュミットトリガ回路であり、閾値作用を持ち、PSPが一定以上の電位になると、その期間、出力パルスを生ずる。このB4出力が単安定マルチ通過後、入力波形と同じ波形に整形されて最終段の出力となっている。ここで、絶対不応期は、B5の単安定マルチ出力をB2にフィードバックさせ、この期間中は新しい入力が到達してもB2には出力を生じないようにした。相対不応期としては、閾値を変化させる代りとして、出力パルスが出たとき、PSPの大きさそのものを、B8のフィードバック回路を通して相対的に変化することによって実現した。なお、空間的加重については、B1で各入力が抵抗を介して減衰加算されるようにし、入力パルスについては、出力パルスを得ると同じ回路を用い、すなわちB7のRLC回路にパルス入力を与えて実現した。その他、抑制入力に対しては後述するようにPS

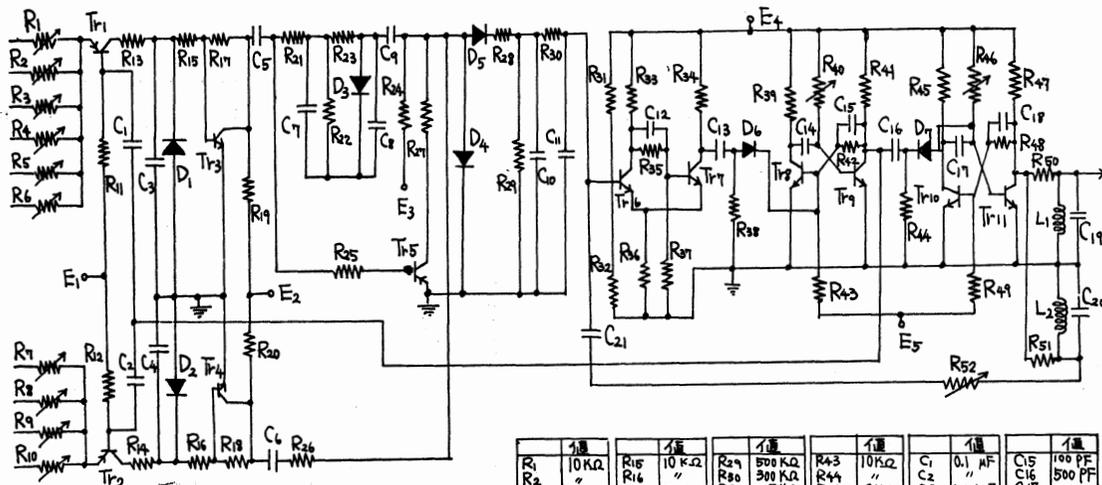


図-9 回路

C1	10 K Ω	R15	10 K Ω	R29	500 K Ω	R43	105 Ω	C1	0.1 μ F	C5	100 PF
R16	10 K Ω	R16	10 K Ω	R30	300 K Ω	R44	300 K Ω	C2	0.1 μ F	C6	500 PF
R17	"	R17	50 K Ω	R31	5 K Ω	R45	2 K Ω	C3	0.001 μ F	C7	100 PF
R18	"	R18	20 K Ω	R32	20 K Ω	R46	20 K Ω	C4	"	C8	"
R19	"	R19	10 K Ω	R33	5 K Ω	R47	1 K Ω	C5	0.05 μ F	C9	500 PF
R20	"	R20	5 K Ω	R34	2 K Ω	R48	5 K Ω	C6	"	C10	"
R21	300 Ω	R21	300 Ω	R35	2 K Ω	R49	10 K Ω	C7	0.001 μ F	C11	"
R22	500 Ω	R22	500 Ω	R36	50 Ω	R50	2 K Ω	C8	"	C12	100 PF
R23	50 K Ω	R23	50 K Ω	R37	500 Ω	R51	1 K Ω	C9	0.1 μ F	C13	500 PF
R24	100 K Ω	R24	100 K Ω	R38	10 Ω	R52	10 K Ω	C10	500 PF	C14	"
R25	5 K Ω	R25	5 K Ω	R39	2 K Ω			C11	"	C15	"
R26	200 Ω	R26	200 Ω	R40	20 K Ω			C12	100 PF	C16	"
R27	500 Ω	R27	500 Ω	R41	1 K Ω			C13	500 PF		
R28	30 K Ω	R28	30 K Ω	R42	5 K Ω			C14	"		

トランジスタ: 2SA311, 2SC371

ダイオード: 1S1516

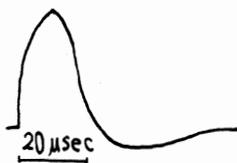


図-10 入力波形

Pの上昇を抑制するようにのみ働くようにした。

4. Neutomime 各部の入出力波形

(i) 閾値以下興奮性入力の場合

入力の大きさが比較的小さいとき、もしくは、入力がB1の変抵抗で大幅減衰されたとき、PSPも小さくなり、閾値を越すに至らない。したがって、この場合、出力パルスを生ずることはなく、B4~B8の部分は動作しない。このときのEPSPの波形を図-11に示す。

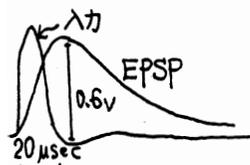


図-11 閾値を越さないときのEPSP

(ii) 閾値を越す入力の場合

入力量が大きく、閾値を越える入力を用いるとB4のシュミットトリガ回路は出力パルスを生ずる。このとき、B8からのフィードバックがあるため、B4の入力波形そのものも、この影響を受ける。いったん、B4に出力パルスを生ずると、B5によって一定時間幅のパルスに変換し、さらに、B6の単安定マルチで遅延させ、最終段の出

カパルスとした。このときの初段入力、B4入力、B4出力、B5出力、B6出力、最終段出力の波形を図-12に示した。さらに入力量が大きくなると、一発の出力パルスが生じた後、PSPは再び閾値に達し、もう一発の出力パルスを生ずるようになる。すなわち一発の入力パルスにより、2発の出力パルスが生ずる。(図-12(B))

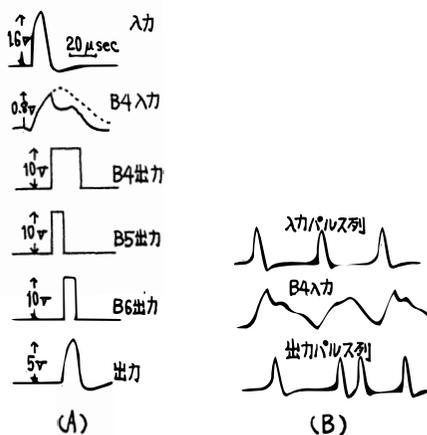


図-12 閾値を越す入力の際の各部波形

(iii) 抑制性入力に関して

抑制性入力は、スパイクの発火に直接の関係は

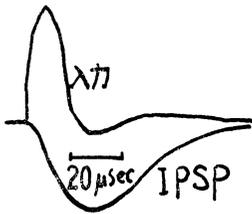


図-13

なく、 $B2 \cdot h$ の出力として図-13の波形を作り出しこれによってPSPの上昇を抑制するだけの働きを持つようにした。したがって抑制入力

のみの場合、 $B4$ 以下の回路は動作せず、出力には全く関与しない。

5. 実験結果

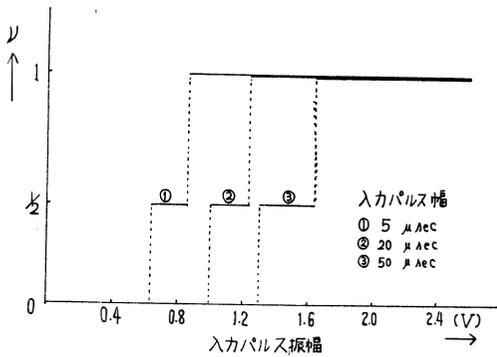


図-14 入力パルス量と出力パルス数

本回路の入出力特性を示す。図-14に単一興奮性入力の振幅に対するその出力パルス数の関係を、また、時間的に続いて、同じ大きさのパルスが入るときの入力パルス間隔に対するその出力パルス間隔の関係を図

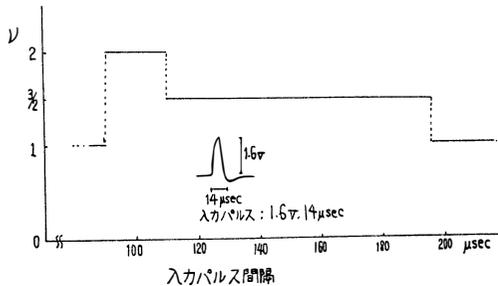


図-15(A) 入力パルス間隔と出力パルス数

15に示した。ただし、 ν は次の関係を示す。

$$\nu = \frac{\text{出力パルス数}}{\text{入力パルス数}}$$

また、閾値の大きさ、フィードバック量を変えると、その出力パルス数も変化するが、この場合、ほんのわずかの調整によって、その出力パルス数が著しく

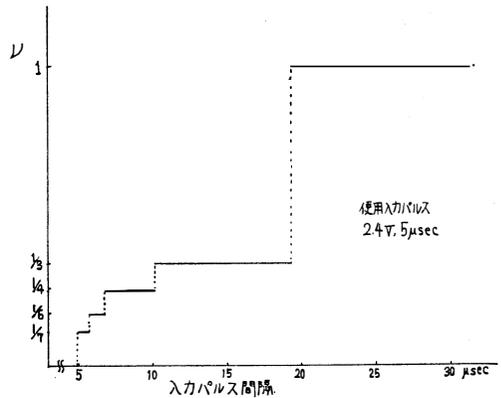


図-15(B) 入力パルス間隔の短いときの入出力パルス数

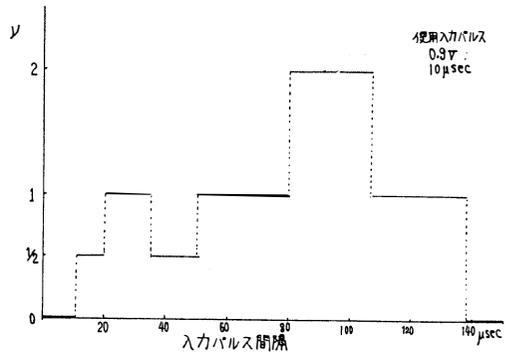


図-15(C) フィードバック量を大きくしたときの入出力パルス数

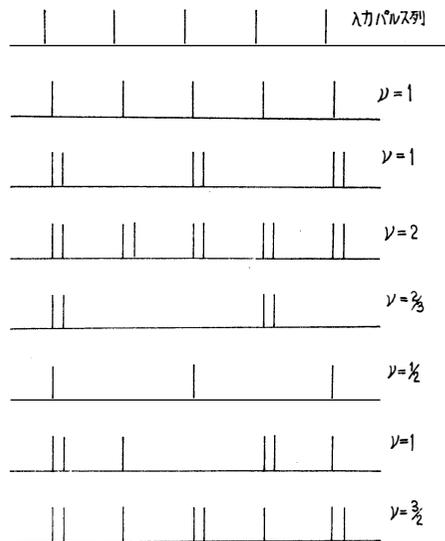


図-16 様々な出力パルス列

変化するので、図-16に閾値やフィードバック量を変えたときの、出力波形の変化の様子を示すだけとする。図に示されるように、同一の ν であっても異なる出力パルスの出し方をしている。

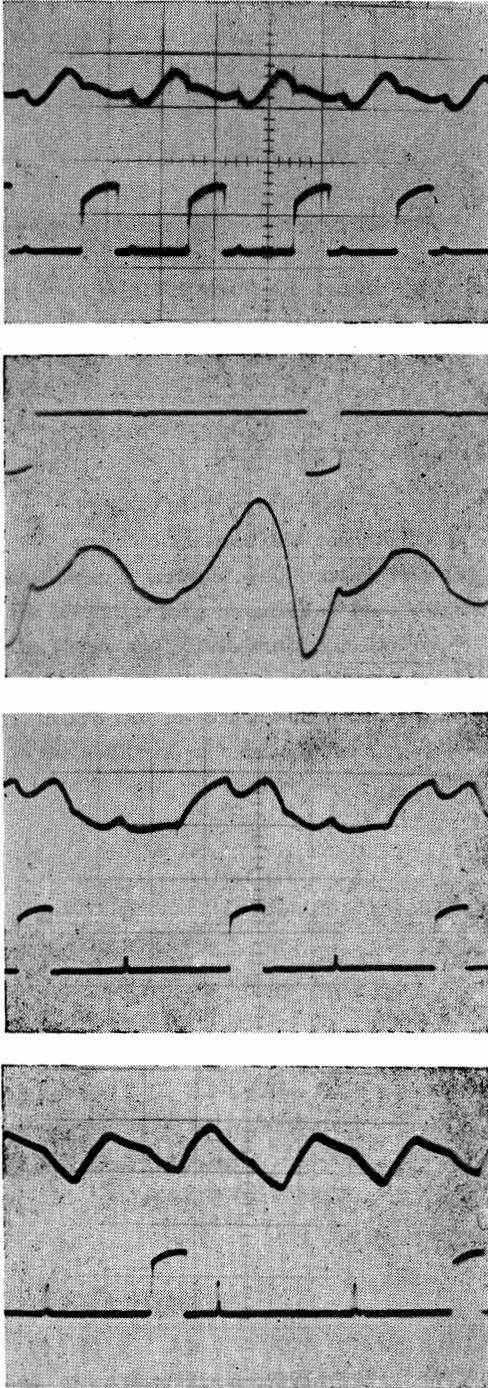


図-17 シュミットトリガ入出力波形

6. 考 察

以上のように、本回路の特性は主として図-14, 15に代表されるが、(1)入力振幅、(2)入力パルスの時間幅、(3)入力パルス間隔、(3)閾値の大きさ、(4)絶対不応期、(5)相対不応期、などを変化することによって、非常に多くの入出力関係が得られる。これらの特性は、すべて単一のシナプス入力に対してのものである。多入力の場合および入力パルス間隔の一定でない入力については、更に複雑な特性を示すと思われるが、これについては後に報告する予定である。

参 考 文 献

1. 神経の生物物理 (日本生物物理学会編)
2. L.D.Harmon:Kybernetik, 1,3Dez, 89-101, 1961
3. E.R.Lewis:IEEE Trans.BIO.-MED.ELECTRON-ICS Oct.130-137.1963
4. F.Jenik:Neural Theory and Modeling.
Proc.1962, Ojai Symp. (ed.by.R.F.Reises)
Stanford University Press.