

神経回路網の動的入力刺激に対する応答

竹崎 智康*・鳥岡 豊士**・平田 威彦***

Response of a Neural Net for Moving Input Stimuli

Tomoyasu TAKEZAKI*, Toyoshi TORIOKA** and Takehiko HIRATA***

Abstract

We give a simple neural network consisting of many excitatory elements (excitatory layer) and an inhibitory element, and reveal some basic properties of this model for further study. We derive an equation of wave form which represents the response of the excitatory layer for a moving stimulus. Simultaneously we consider the effect of an excitatory weight function of the wave form. Then the validity of the equation giving the wave form is examined through a computer simulated-experiment.

1. 緒 言

神経回路網の研究を行なう際に生理学的立場と工学的立場がある。前者の場合実際に生体内に見られる神経回路網を直接扱い、後者の場合生体内の神経回路網に対応する回路網を考え、その工学的性質を調べていく。言いかえれば前者は微視的な立場であり、後者は巨視的な立場である。本文では後者の立場に立ち神経回路網に動的刺激が与えられた場合の対応について考察する。このような動的刺激に対する神経回路網の応答についてはすでに甘利¹⁾や Burt²⁾によって調べられている。しかしこれらの研究では動的な応答の詳細な解析は行なわれていない。

ここでは多数の興奮性素子(興奮層)と抑制性素子から成る回路網を与え、動的刺激に対する応答について考察する。この際入力刺激の動きに追従して移動する興奮層の応答波形の理論式を示す。同時に興奮層における相互作用を決定する重み関数が応答波形に与える影響を調べる。加えてシミュレーション実験を通して理論式の妥当性を検討する。これらの考察を通し、動的刺激に対する神経回路網の基本的な性質を明らかにする。

* 大学院 電気工学専攻

** 工業短期大学部 情報処理工学科

*** 電気工学科

2. 神経回路網の説明

ここで用いる神経回路網を Fig. 1 に示す。この回路において E 層の各素子は興奮性であり、 I 素子は抑制性である。興奮性の各素子は入力刺激 S の他に重み関数 w_1 で近傍の素子から興奮性の入力を受ける。同時に抑制性素子より等しい荷重 w_2 で抑制性の入力を受ける。一方抑制性素子は E 層の全素子から興奮性の入力を受ける。なお E 層の左端素子と右端素子は同じ結合方式 (rap-around 方式) で結合されているものとする³⁾。ここで E 層素子の電位を u_E 、 I 素子の電位を u_I 、 E 層素子の出力関数を f 、 I 素子の出力関数を g とすると、 E 層 k 番目素子ならびに I 素子の電

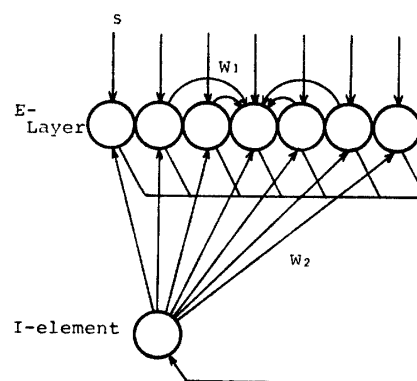


Fig. 1 Neural net.

位変化は次の微分方程式で表わせる。但し E 層素子は同質 (homogenous) とする。

$$\tau_1 \frac{du_{Ek}}{dt} = -u_{Ek} + \sum_k w_1 f(u_E) - w_2 g(u_I) - h_1 + S \quad \dots\dots (1)$$

$$\tau_2 \frac{du_I}{dt} = -u_I + \sum_j f(u_{Ej}) - h_2 \quad \dots\dots (2)$$

但し, $f(\alpha) = \begin{cases} 1: \alpha > 0 \\ 0: \alpha \leq 0 \end{cases}, g(\alpha) = \begin{cases} \alpha: \alpha > 0 \\ 0: \alpha \leq 0 \end{cases} \quad \dots\dots (3)$

ここに $\sum_k w_1 f(u_E)$ は E 層 k 番目素子が k 番目素子を中心にして両側の素子から左右対称に受ける興奮性相互作用の総和を示す。 τ は時定数, h は素子閾値, S は外部からの入力刺激である。なおここでは興奮性相互作用を決定する重み関数 w_1 は Fig. 2 に示す形の距離関数とする。

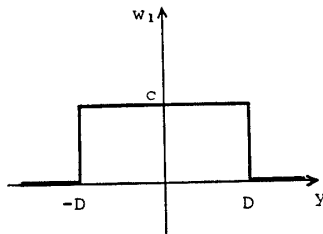


Fig. 2 Weight function w_1 .

3. 回路網の刺激応答

動的刺激が与えられた場合 E 層の各素子の応答は、
 i) I 素子による抑制が強いかなる素子も発火しない。
 ii) ある一定区間の素子のみが発火し入力刺激の動きに追従する。
 iii) I 素子による抑制が弱く入力を与えられた素子すべてが発火する。の3つの場合に分けられる。このうち工学的に興味深いものは ii) の場合である。本章では ii) の場合の解析を行なっていく。解析方法としてはまず一定幅の発火により各素子にもたらされる興奮性の相互作用 (すなわち $\sum_k w_1 f(u_E)$) の大きさを求め、次にそれをもとに各素子の電位を求める。

3.1 興奮性相互作用 $\sum w_1 f(u_E)$ の決定

興奮性素子の出力関数が (3) 式で与えられるため、細胞が密に並んでいるとすれば興奮性相互作用は次のように近似できる。

$$\sum_y w_1 f(u_E) = \int_{y_1}^{y_2} w_1(y-y') dy' = W(y) \quad \dots\dots (4)$$

但し、興奮性素子の発火領域は y_1 から y_2 とする。従って $W(y)$ は場所 y における細胞にもたらされる興奮性相互作用の大きさとなる。 $2D < y_2 - y_1$ の場合、 $W(y)$ は y の位置により以下の様に与えられる。

i) $y_2 + D < y$ のとき

Fig. 3 に示すようにこの領域の素子は発火領域から D 以上離れているため、何ら相互作用を受けない。

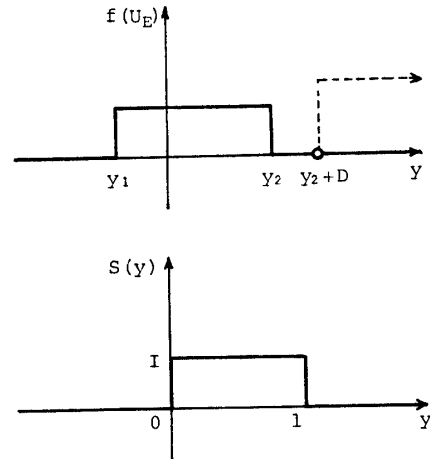


Fig. 3 Relation between input and excited in the case of $y_2 + D < y$.

従って $W(y)$ は

$$W(y) = 0$$

となる。

ii) $y_2 - D < y \leq y_2 + D$ のとき

Fig. 4 に示すように $y = y_2 + D$ の素子は 0 個、 $y = y_2 - D$ の素子は $2D$ 個の発火素子から相互作用を受けることになり、 $W(y)$ は

$$W(y) = C(-y + y_2 + D)$$

となる。

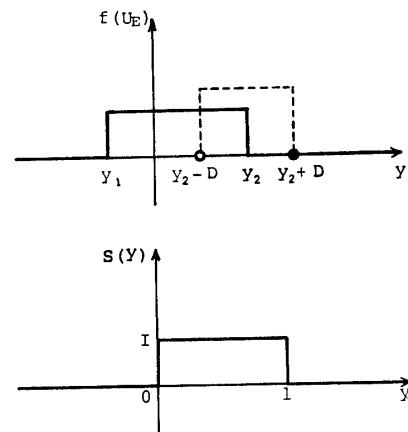


Fig. 4 Relation between input and excited in the case of $y_2 - D < y \leq y_2 + D$.

iii) $y_1 + D < y \leq y_2 - D$ のとき

Fig. 5 に示すようにこの領域では必ず $2D$ 個の発火素子から相互作用を受けており, $W(y)$ は

$$W(y) = 2CD$$

となる.

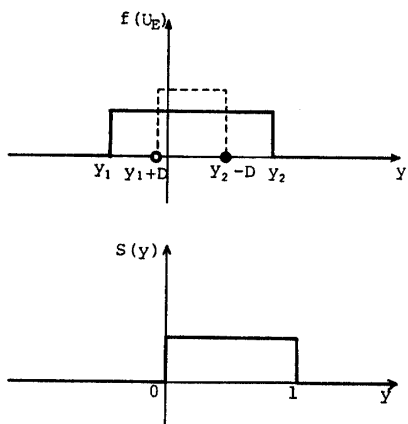


Fig. 5 Relation between input and excited in the case of $y_1 + D < y \leq y_2 - D$.

iv) $y_1 - D < y \leq y_1 + D$ のとき

ii) の場合と同様 $y = y_1 + D$ の素子は $2D$ 個, $y = y_1 - D$ の素子は 0 個の発火素子から相互作用を受けており, $W(y)$ は

$$W(y) = C(y - y_1 + D)$$

となる.

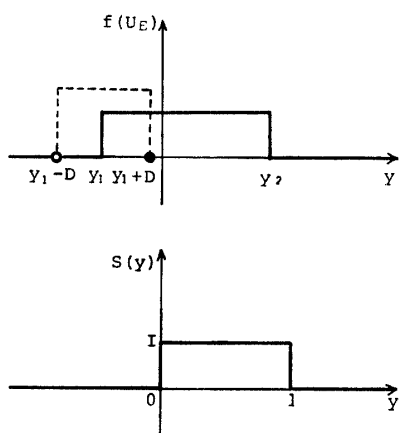


Fig. 6 Relation between input and excited in the case of $y_1 - D < y \leq y_1 + D$.

v) $y \leq y_1 - D$ のとき

i) と同様この領域の素子は発火領域から D 以上離れているため, 何ら相互作用を受けない. 従って

$$W(y) = 0$$

となる. 以上 5 つの場合の $W(y)$ をまとめると,

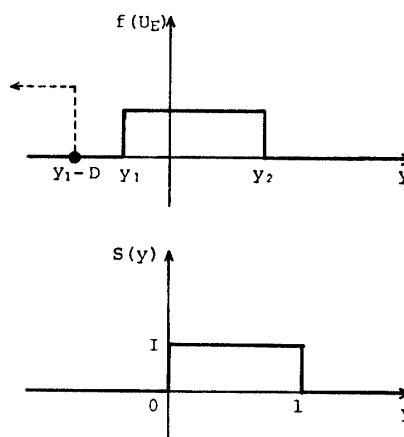


Fig. 7 Relation between input and excited in the case of $y \leq y_1 - D$.

$$W(y) = \begin{cases} 0 & : y \leq y_1 - D \\ C(y - y_1 + D) & : y_1 - D < y \leq y_1 + D \\ 2CD & : y_1 + D < y \leq y_2 - D \\ C(-y + y_2 + D) & : y_2 - D < y \leq y_2 + D \\ 0 & : y_2 + D < y \end{cases} \dots (5)$$

となり Fig. 8 のような台形状となる. $2D > y_2 - y_1$ の場合も同様に $W(y)$ を求めることができる. 付録 1 に具体的に求めた $W(y)$ を示す.

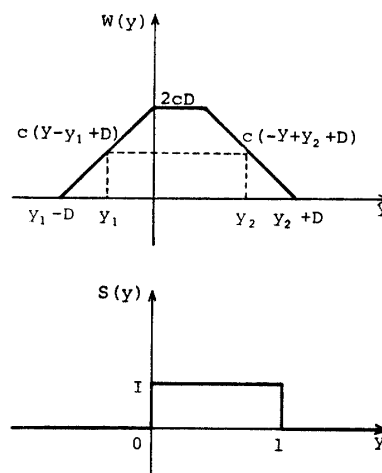


Fig. 8 Interactive excitation provoked by excitatory area.

3.2 興奮性素子の電位

ここで用いる動的刺激とそれに対する回路網の応答について具体的に説明しよう. 動的刺激は Fig. 9 (b) に示すような幅 l , 強さ I の矩形とする. そして一定速度 v で右方向に移動しているものとなる. それに対して Fig. 9 (a) に示すように y_1 から y_2 の素子が発火

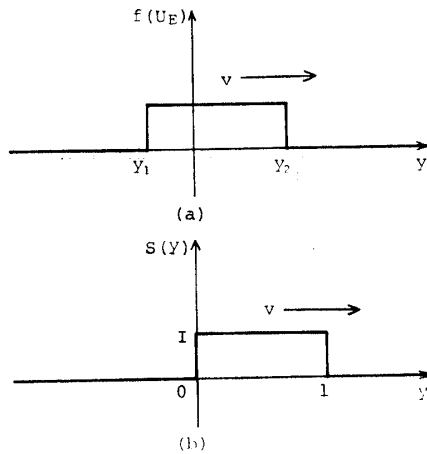


Fig. 9 Relation between response and input.

しているものとする。もちろん素子の発火は速度 v で動的刺激に追従するものとする。なお原点は常に刺激入力左端とする。このような刺激入力を与えられた場合、場所 y における電位 $u_E(y)$ は (1) 式より

$$u_E(y) = \frac{1}{\tau_1 v} \int_y^\infty e^{(y-y')/\tau_1 v} \{W(y') + S(y')\} dy' - w_2 g(a - h_2) - h_1 \quad \dots\dots (6)$$

となる。(6) 式の導出方法は付録 2 に示す。ここに $W(y)$ は興奮性相互作用の総和、 $S(y)$ は刺激入力、 $w_2 g(a - h_2)$ は抑制素子からの抑制入力、 $a (= y_2 - y_1)$ は発火領域、 h_1, h_2 はそれぞれ興奮性素子、抑制性素子の閾値である。(6) 式で発火領域 a を除いた項はすべて既知である。 $u_E(y)$ を具体的に求めるためにはまず a を決定する必要がある。以下 y_1, y_2 の決定方法について述べる。

発火領域の両端素子の電位 $u_E(y_1), u_E(y_2)$ を具体的に求めると $y_1 < 0, y_2 < l$ の場合

$$u_E(y_1) = C(D + \tau_1 v - \tau_1 v e^{-D/\tau_1 v}) + C\tau_1 v (e^{(y_1 - y_2 - D)/\tau_1 v} - e^{(y_1 - y_2 + D)/\tau_1 v}) + I e^{y_1/\tau_1 v} (1 - e^{-l/\tau_1 v}) - w_2 g(y_2 - y_1 - h_2) - h_1 \quad \dots\dots (7)$$

$$u_E(y_2) = C(D - \tau_1 v + \tau_1 v e^{-D/\tau_1 v}) + I(1 - e^{(y_2 - l)/\tau_1 v}) - w_2 g(y_2 - y_1 - h_2) - h_1 \quad \dots\dots (8)$$

となる。(付録 3 参照) y_1, y_2 が発火領域の両端となるためには $u_E(y_1) = u_E(y_2) = 0$ でなければならない。しかしこの両式から y_1, y_2 を具体的に求めることは困難である。従って y_1, y_2 を求めるには数値計算に訴えなければならない。この方法については付録 4 に示す。次に発火領域 a を用いて $u_E(y)$ を具体的に求めよ

う。興奮性相互作用 $W(y)$ が (5) 式で与えられるため $u_E(y)$ も 5 つの場合に分かれる。

i) $y_2 + D < y$ の場合

$W(y) = 0, S(y) = 0$ となるため、

$$u_E(y) = -w_2 g(a - h_2) - h_1$$

となる。

ii) $y_2 - D < y \leq y_2 + D$ の場合

$$u_E(y) = \frac{1}{\tau_1 v} \left\{ \int_y^{y_2 + D} C(-y' + y_2 + D) e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' + \int_y^l I e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' \right\} - w_2 g(a - h_2) - h_1 = C\{-y + y_2 + D + \tau_1 v (e^{(y-y_2-D)/\tau_1 v} - 1)\} + I(1 - e^{(y-l)/\tau_1 v}) - w_2 g(a - h_2) - h_1$$

iii) $y_1 + D < y \leq y_2 - D$ の場合

$$u_E(y) = \frac{1}{\tau_1 v} \left\{ \int_y^{y_2 - D} 2CD e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' + \int_{y_2 - D}^{y_2 + D} C(-y' + y_2 + D) e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' + \int_y^l I e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' \right\} - w_2 g(a - h_2) - h_1 = 2CD + C\tau_1 v (e^{(y-y_2-D)/\tau_1 v} - e^{(y-y_2+D)/\tau_1 v}) + I(1 - e^{(y-l)/\tau_1 v}) - w_2 g(a - h_2) - h_1$$

iv) $y_1 - D < y \leq y_1 + D$ の場合

$y > 0$ のとき

$$u_E(y) = \frac{1}{\tau_1 v} \left\{ \int_y^{y_1 + D} C(y' - y_1 + D) e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' + \int_{y_1 + D}^{y_2 - D} 2CD e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' + \int_{y_2 - D}^{y_2 + D} C(-y' + y_2 + D) e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' + \int_y^l I e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' \right\} - w_2 g(a - h_2) - h_1 = C\{y - y_1 + D + \tau_1 v (1 - e^{(y-y_1-D)/\tau_1 v})\} + C\tau_1 v (e^{(y-y_2-D)/\tau_1 v} - e^{(y-y_2+D)/\tau_1 v}) - w_2 g(a - h_2) - h_1 + I(1 - e^{(y-l)/\tau_1 v})$$

$y < 0$ のとき

$$u_E(y) = \frac{1}{\tau_1 v} \left\{ \int_y^{y_1 + D} C(y' - y_1 + D) e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' + \int_{y_1 + D}^{y_2 - D} 2CD e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_{y_2-D}^{y_2+D} C(-y'+y_2+D)e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' \\
 & + \int_0^l Ie^{(y-y')/\tau_1 v} dy' \} - w_2 g(a-h_2) - h_1 \\
 = & C\{y-y_1+D+\tau_1 v(1-e^{(y-y_1+D)/\tau_1 v})\} \\
 & + C\tau_1 v(e^{(y-y_2-D)/\tau_1 v} - e^{(y-y_2+D)/\tau_1 v}) \\
 & - w_2 g(a-h_2) - h_1 + Ie^{y/\tau_1 v}(1-e^{-l/\tau_1 v})
 \end{aligned}$$

v) $y < y_1 - D$ の場合

$$\begin{aligned}
 u_E(y) = & \frac{1}{\tau_1 v} \left\{ \int_{y_1-D}^{y_1+D} C(y'-y_1+D)e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' \right. \\
 & + \int_{y_1+D}^{y_2-D} 2CD e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' \\
 & + \int_{y_2-D}^{y_2+D} C(-y'+y_2+D)e^{(y-y')/\tau_1 v} dy' \\
 & \left. + \int_0^l Ie^{(y-y')/\tau_1 v} dy' \right\} - w_2 g(a-h_2) - h_1 \\
 = & e^{(y-y_1+D)/\tau_1 v} \{ C\tau_1 v(1-e^{-2D/\tau_1 v}) \\
 & + C\tau_1 v(e^{(y-y_2-D)/\tau_1 v} - e^{(y-y_2+D)/\tau_1 v}) \} \\
 & - w_2 g(a-h_2) - h_1 + Ie^{y/\tau_1 v}(1-e^{-l/\tau_1 v})
 \end{aligned}$$

以上をまとめると

$$u_E(y) = \begin{cases} -w_2 g(a-h_2) - h_1: & y_2 + D < y \\ C\{-y + y_2 + D + \tau_1 v(e^{(y-y_2-D)/\tau_1 v} - 1)\} \\ \quad + I(1 - e^{(y-l)/\tau_1 v}) - w_2 g(a-h_2) - h_1: & y_2 - D < y \leq y_2 + D \\ 2CD + C\tau_1 v(e^{(y-y_2-D)/\tau_1 v} \\ \quad - e^{(y-y_2+D)/\tau_1 v}) + I(1 - e^{(y-l)/\tau_1 v}) \\ -w_2 g(a-h_2) - h_1: & y_1 + D < y \leq y_2 - D \\ C\{y - y_1 + D + \tau_1 v(1 - e^{(y-y_1-D)/\tau_1 v})\} \\ \quad + C\tau_1 v(e^{(y-y_2-D)/\tau_1 v} - e^{(y-y_2+D)/\tau_1 v}) \\ -w_2 g(a-h_2) - h_1 \\ \quad + \begin{cases} I(1 - e^{(y-l)/\tau_1 v}): & (y > 0) \\ Ie^{y/\tau_1 v}(1 - e^{-l/\tau_1 v}): & (y < 0) \end{cases} \\ e^{(y-y_1+D)/\tau_1 v} \{ C\tau_1 v(1 - e^{-2D/\tau_1 v}) \\ \quad + C\tau_1 v(e^{(y-y_2-D)/\tau_1 v} - e^{(y-y_2+D)/\tau_1 v}) \} \\ -w_2 g(a-h_2) - h_1 + Ie^{y/\tau_1 v}(1 - e^{-l/\tau_1 v}): & y < y_1 - D \end{cases} \dots\dots (9)$$

となる。

4. シミュレーション結果

本章では計算機シミュレーション実験によって求めた動的応答と(9)式により与えられる応答を比較してみる。ここで用いるシミュレーション実験方法について説明する。回路網は100個のE素子から成り立ち両側素子は rap-around 方式で結合されている。計算は入力刺激がE素子1個分だけ移動する時間をきざみ幅とし、きざみ幅毎に100個すべての素子電位を求めた。そして電位が入力刺激に追従して移動するようになるまで計算を繰り返した。パラメータ値を $l=10, I=1.5, v=100, D=2.0, c=0.2, w_2=0.03, \tau_1=0.01, \tau_2=0.01, H_1=0.5, H_2=0.2$ とした場合のシミュレーション結果と(9)式の結果を Fig. 10 に示す。電位の形状はほぼ良好な一致を示しているものの、シミュレーション結果の方がやや高い値となっている。この原因は繰り返し計算により誤差と考えられる。

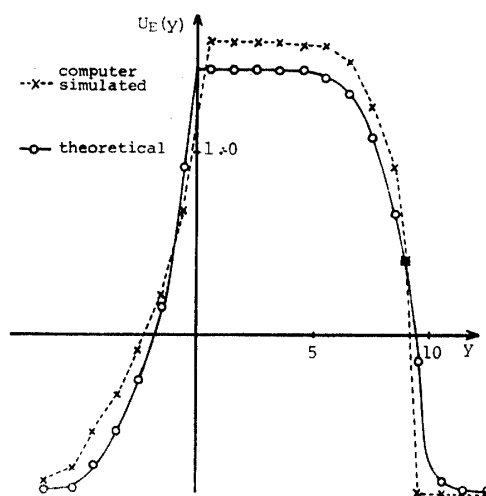


Fig. 10 Comparison between theoretical and computer simulated wave form.

5. まとめ

本文では多数の興奮性素子と1つの抑制性素子から成る回路網に動的刺激を与えた場合の応答について調べた。特に工学的に有意義と思われる入力刺激の動きに追従するような応答について詳細な解析を行なった。そして動的刺激に対する回路網の応答波形を与える理論式を導いた。同時に興奮性相互作用を決定する重み関数 w_1 が応答に大きな影響を与えることを明らかにした。又この理論式の妥当性をシミュレーション実験を通して示した。この際理論値とシミュレーション実

験結果には多少の不一致が見られた。この原因は繰り返し計算による誤差及び演算方法によると思われる。この点については検討の必要がある。またパラメータによる波形の変化を明らかにするためより多くのシミュレーション実験を行なうことも必要である。

本文で明らかにした結果は工業用ロボットの視覚系における動的入力処理、移動物体の立体視に関する研究に利用できると思われる。今後はこの基本研究をもとに、より複雑な動的刺激(たとえば時間的減衰を伴った動的刺激)に対する応答の研究や移動物体の立体視の研究などを進めていく予定である。

付録 1

$2D > y_2 - y_1$ の場合発火領域が $2D$ より小さいため最大 $y_2 - y_1$ 個の素子が相互作用を及ぼす。従って $W(y)$ は

$$W(y) = \begin{cases} 0 & : y \leq y_1 - D \\ C(y - y_1 + D) & : y_1 - D < y \leq y_1 + D \\ C(y_2 - y_1) & : y_1 + D < y \leq y_2 - D \\ C(-y + y_2 + D) & : y_2 - D < y < y_2 + D \\ 0 & : y_2 + D < y \end{cases} \dots\dots (10)$$

付録 2

(1) 式において電位 u_E が入力 S に追従して共に速度 v で移動する場合、 u_E, S は場所 x と時間 t の関数として、

$$\begin{aligned} u_E(x, t) &= u_E(x - vt) \\ S(x, t) &= S(x - vt) \end{aligned} \dots\dots (11)$$

と表わせる。 $y = x - vt$ とおいて変数変換すれば (1) 式は

$$\begin{aligned} -\tau_1 v \frac{du_E}{dy} &= -u_E + \int_{y_1}^{y_2} w_1(y - y') dy' \\ &\quad - w_2 g(u_I(t)) - h_1 + S(y) \end{aligned} \dots\dots (12)$$

となる。さらに抑制素子の時定数が非常に小さい ($\tau_2 \Rightarrow 0$) とすれば、

$$u_I(t) = a - h_2$$

となり、(12) は

$$\begin{aligned} -\tau_1 v \frac{du_E}{dy} &= -u_E + \int_{y_1}^{y_2} w_1(y - y') dy' \\ &\quad - w_2 g(a - h_2) - h_1 + S(y) \end{aligned} \dots\dots (13)$$

と書き改められる。この微分方程式を解けば、

$$u_E(y) = \frac{1}{\tau_1 v} \int_y^\infty e^{(y-y')/\tau_1 v} (W(y') + S(y')) dy' - w_2 g(a - h_2) - h_1$$

が得られる。

付録 3

$u_E(y_1), u_E(y_2)$ については y_1, y_2 の位置によって積分範囲が異なってくる。各場合に対してそれぞれ $u_E(y_1), u_E(y_2)$ を求めると、

$y_1 < 0$ のとき

$$\begin{aligned} u_E(y_1) &= \frac{1}{\tau_1 v} \left\{ \int_{y_1}^{y_1+D} C(y' - y_1 + D) e^{(y_1-y')/\tau_1 v} dy' \right. \\ &\quad + \int_{y_1+D}^{y_2-D} 2CD e^{(y_1-y')/\tau_1 v} dy' \\ &\quad + \int_{y_2-D}^{y_2+D} C(-y' + y_2 + D) e^{(y_1-y')/\tau_1 v} dy' \\ &\quad \left. + \int_0^l I e^{(y_1-y')/\tau_1 v} dy' \right\} \\ &\quad - w_2 g(y_2 - y_1 - h_2) - h_1 \\ &= C(D + \tau_1 v - \tau_1 v e^{-D/\tau_1 v}) \\ &\quad + C\tau_1 v (e^{(y_1-y_2-D)/\tau_1 v} - e^{(y_1-y_2+D)/\tau_1 v}) \\ &\quad + I e^{y_1/\tau_1 v} (1 - e^{-l/\tau_1 v}) \\ &\quad - w_2 g(y_2 - y_1 - h_2) - h_1 \end{aligned} \dots\dots (13')$$

$y_1 > 0$ のとき

$$\begin{aligned} u_E(y_1) &= \frac{1}{\tau_1 v} \left\{ \int_{y_1}^{y_1+D} C(y' - y_1 + D) e^{(y_1-y')/\tau_1 v} dy' \right. \\ &\quad + \int_{y_1+D}^{y_2-D} 2CD e^{(y_1-y')/\tau_1 v} dy' \\ &\quad + \int_{y_2-D}^{y_2+D} C(-y' + y_2 + D) e^{(y_1-y')/\tau_1 v} dy' \\ &\quad \left. + \int_{y_1}^l I e^{(y_1-y')/\tau_1 v} dy' \right\} \\ &\quad - w_2 g(y_2 - y_1 - h_2) - h_1 \\ &= C(D + \tau_1 v - \tau_1 v e^{-D/\tau_1 v}) \\ &\quad + C\tau_1 v (e^{(y_1-y_2-D)/\tau_1 v} \\ &\quad - e^{(y_1-y_2+D)/\tau_1 v}) + I(1 - \tau_1 v e^{(y_1-l)/\tau_1 v}) \\ &\quad - w_2 g(y_2 - y_1 - h_2) - h_1 \end{aligned} \dots\dots (13'')$$

$y_2 < l$ のとき

$$u_E(y_2) = \frac{1}{\tau_1 v} \int_{y_2}^{y_2+D} C(-y' + y_2 + D)$$

$$\begin{aligned}
 & e^{(y_2-v')/\tau_1 v} dy' + \int_{y_2}^l I e^{(y_2-v')/\tau_1 v} dy' \} \\
 & -w_2 g(y_2 - y_1 - h_2) - h_1 \\
 & = C(D - \tau_1 v + \tau_1 v e^{-D/\tau_1 v}) + I(1 - e^{(y_2-l)/\tau_1 v}) \\
 & -w_2 g(y_2 - y_1 - h_2) - h_1 \quad \dots\dots (14')
 \end{aligned}$$

$y_2 > l$ のとき

$$\begin{aligned}
 u_E(y_2) &= \frac{1}{\tau_1 v} \int_{y_2}^{y_2+D} C(-y' + y_2 + D) dy' \\
 & -w_2 g(y_2 - y_1 - h_2) - h_1 \\
 & = C(D - \tau_1 v + \tau_1 v e^{-D/\tau_1 v}) \\
 & -w_2 g(y_2 - y_1 - h_2) - h_1 \quad \dots\dots (14'')
 \end{aligned}$$

となる。従って $u_E(y_1), u_E(y_2)$ の組み合わせは (13')-(14'), (13')-(14''), (13'')-(14'), (13'')-(14'') の 4 種類となる。本文では (13')-(14') を用いている。

付録 4

(7), (8) 式から y_1, y_2 を求めるためには 2 分法による近似計算を用いる。条件より $0 \sim l$ の区間に y_2 が

存在することは明らかである。従って $y_2 = (0+l)/2$ を初期値として (7) 式より y_1 を決定する。次に (8) 式より $u_E(y_1)$ を求める。 $u_E(y_1) < 0$ であれば真の y_2 は $0 \sim l/2$ の間に、 $u_E(y_1) > 0$ であれば真の y_2 は $l/2 \sim l$ の間に存在することがわかる。以下この操作を繰り返すことにより解の存在範囲を絞っていき y_1, y_2 の値を決定する。

参 考 文 献

- 1) S. Amari: Dynamics of Pattern Formation in Lateral-Inhibition Type Neural Fields, COINS Technical Report, The Center for Systems Neuroscience University of Massachusetts (1976)
- 2) P. J. Burt: Int. J. Man-Machine Studies, **7**, 529 (1975)
- 3) M. Ejiri and T. Tokunaga: Pattern Recognition Pergamon, Press **8**, 201 (1976)
- 4) 甘利俊一: 神経回路網の数理, 産業図書
- 5) P. Dev: Int. J. Man-Machine Studies, **7**, 511 (1975)
- 6) 竹崎他: 山口大学工学部研究報告, **30**, 365 (1980)

(昭和 55 年 4 月 3 日 受理)