

場の幾何学的形状に依存する興奮波伝播パターンと情報処理

公立ほこだて未来大学 システム情報科学部
(School of Systems Information Science, Future University - Hakodate)

元池 育子 (Motoike N. Ikuko)

1 緒言

生物は、脳・神経系の有無にかかわらず、内外の情報を受け、処理し、応答して生きている。その情報処理のメカニズムを知ろうと、これまで数多くの研究がなされてきている。しかし、人工ニューラルネットワークモデルに代表される従来の人工情報処理モデルでは、情報処理のユニットは、空間サイズをもたない質点的なものとして扱われ、時間情報は人工的に関数に組み入れられることが多かった。ところで実際の生物が情報処理を行う際、一般的に情報担体とされる興奮波は、有限速度で有限空間（距離）を伝播することで、必然的に「時間」という情報を持つ。ここでは、生物の情報処理の根本原理を探ろうという試みのひとつとして、生物の普遍的性質を、情報処理のユニット（細胞）が、動的興奮特性を示し、有限の空間サイズをもつことであると考えた。そしてこれらの特性から「時間」情報が必然的に組み込まれることを用いて、空間の幾何学的効果から要素間の非対称相互作用を取り入れ、信号が「処理」される過程について調べてきている。

2 方法

生体内では細胞同士が離散的に存在する。細胞を興奮場と対応して考え、これを拡散場を介して配置した。方法としては、興奮場及び拡散場の性質を偏微分方程式で記述し、入力側と出力側の興奮場の形状を非対称にして、興奮波の伝播の様子を調べた。

本研究では興奮特性を記述する式としては FitzHugh-南雲方程式を用いた [1]。

$$\begin{cases} \tau \frac{\partial u}{\partial t} = -\gamma \{ku(u - \alpha)(u - \beta) + v\} \\ \quad \quad \quad + D_u \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} = \gamma u \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) は神経伝導方程式であると同時に反応拡散方程式である。ここで、 u は細胞の膜電位に相当し、 v は膜

を透過するイオンの流れに関連した量となる。この方程式は数学的には反応拡散方程式と等価であり、 u は activator(活性因子)、 v は inhibitor(抑制因子) に相当する。式 1 で記述される反応拡散場 ($\gamma = 1$) を形状を非対称にして拡散場 ($\gamma = 0$ かつ $v = 0$) を介して配置した。このような条件下において興奮場形状を変えることによって、場から場への反応波の伝播の様子を調べた。現象としては、閾値を越えた量の activator u が拡散場を介して近くの興奮場に到達した場合、興奮反応が起こる。この現象を以下の文中では信号が隣接場（出力場）に伝播したと呼ぶことにする。

興奮場から拡散場への activator u の拡散分布が、興奮場の形状や興奮波の進行状況にどのように依存するかを調べた結果、形状その他を変えることによって閾値を越える量の activator u が拡散する距離を制御できることがわかった。つまり、興奮場の形状等が、その上を伝播する興奮波の隣接場への影響力を左右することになる。

3 興奮場での論理演算

3.1 整流作用

情報処理の基本において重要な意味をもつのが整流作用（ダイオード特性）を持つ素子である。この事実を用いて興奮／拡散場の形状を考え、計算機実験を行なった。以後の図では、白い領域が興奮場を、黒い領域が拡散場を、そして灰色の領域が興奮場上を進行する興奮波を表す。

図 1 では、拡散場を介して二つの興奮場がそれぞれ直線（180 度）と 90 度の角度をもって対峙している。各々の場を進行する興奮波が境界、そして拡散場に到達したときの拡散場への activator u の染み出しを考えると、直線側からの方が 90 度側からのときよりも大きい。言い換えると、直線側からの興奮波の方がより遠くまで影響力を持ち、伝播できるということである。図 1 ではその結果として、左から右方向のみ、信号（興奮波）を伝播させるという整流作用を示すことがわかる。なお図の形状

で、興奮場間の距離を変えることによって、双方向性、単方向性（ダイオード）、そして対岸に伝播せず信号の消滅という3種類の応答を示すことがわかった。また、同じ形状でも拡散係数や興奮現象への閾値が異なれば、同様に3種類の応答を示すことが示唆される。ちなみにこの形状では、現実空間で、時空間的パターンを示すことで知られている、化学振動反応系（BZ 反応系）を用いて清流作用が見られることが既実証されている [2]。

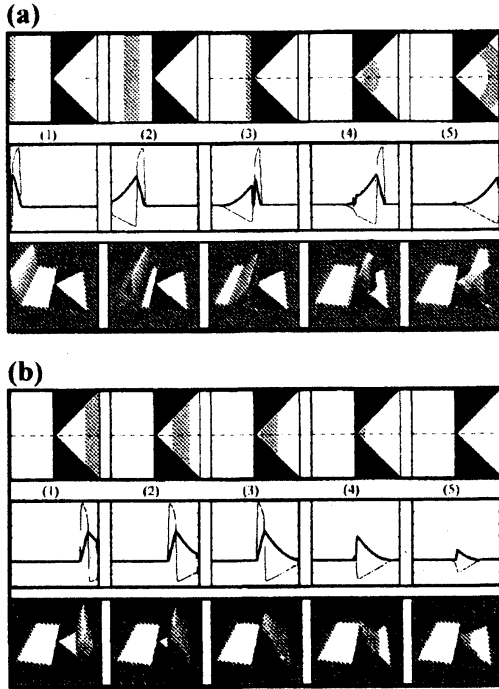


図1: ダイオード。白地は興奮場（反応拡散場）、黒地は拡散場を、灰色の部分は興奮波を表し、右に行くに従って時間が経過する。下段は抑制因子 v の量を高さにとった擬似三次元表現である。(a) は左端から、(b) は右端から入力が行なわれる。この形状では左から右のみ信号が伝播するという、信号伝播に方向性があることがわかる。

3.2 論理演算

生物の行っている情報処理といっても多種多様なものが考えられるが、ここではまず単純に論理演算が以上の枠組み下で表現可能であるかを見る。通常、論理和、否定、論理積の論理演算を実現する論理素子があれば任意の論理関数が合成可能である。本文では一般的な3つの論理素子を作製した。

論理和では図2の形状、配置に設定した。興奮波の存在の有無を真理値の1/0で表現すると、入力が二方向か

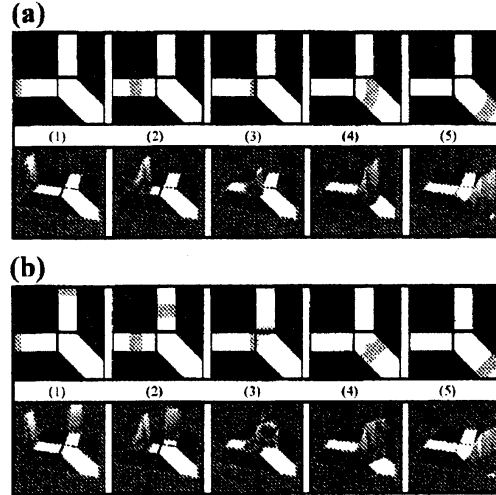


図2: 論理和演算。左端と上端から入力が行なわれ、右下端に出力される。(a) は入力が一つ、(b) は入力が二つの場合を示している。どちらの場合も信号は右下の出力側に伝わり、出力される。

らでも $(1 \vee 1 \rightarrow 1)$ 一方向からでも $(1 \vee 0 \rightarrow 1)$ 右下方向に出力され、論理和に対応すると言える。なお、片方の入力からもう片方の入力への逆流を防ぐような条件に興奮場間の幅を設定してある。

次に否定演算についてであるが図3の様に左方向からの参照信号を必要とするものを設定した。

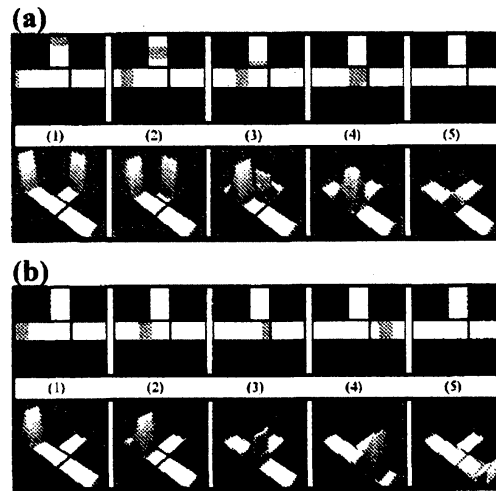


図3: 否定演算。演算される入力は上端から行なわれ、左端からは参照信号が入力される。出力は右端にされる。(a) では、入力信号は参照信号と衝突し、出力側には何も伝播しない。(b) では、入力がいないため、参照信号がそのまま伝播して出力となる。

上方からの入力がされた場合、参照信号と打ち消しあつ

て右方向への出力はない ($-1 \rightarrow 0$)。入力がない場合、参照信号がそのまま右側に伝わり出力される ($-0 \rightarrow 1$)。この素子でも、信号の逆流を防ぐ条件に幅を設定してある。

上述した二つの演算は、通常の論理演算にさらに入力信号における時間条件を課したものとなっているが、論理積、図4ではさらにその時間条件が厳しくなっている。先の2つの演算素子とは異なり、真理値1を出力する

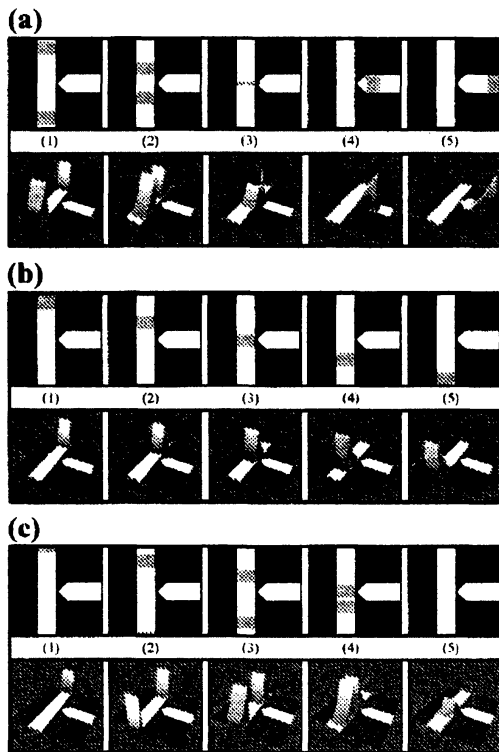


図4: 論理積演算。上端と下端から入力され、右端に出力される。(a)は入力のタイミングが同時で入力同士が真中で衝突した場合で、右側に出力される ($1 \wedge 1 \rightarrow 1$)。(b)は入力のタイミングがずれ、下の方で衝突した場合で出力はされない ($1 \wedge 0 \rightarrow 0$)。

条件は、入力のタイミングが一致することである。つまり、二つの入力が出力場の近辺で衝突した場合にのみ、出力が得られる。したがって、この形状では見方を変えれば出力によってタイミングを知る素子ともいえる。ここではまた、入力の場と出力の場の間隙を調整することによって検出する入力のタイミング条件の幅を帰ることも可能である。

4 時間演算

前節では、論理演算について述べた。しかし実際の生物の情報処理を考えてみると、彼らは(私達は)論理演算で

(のみ)情報処理を行っているとは考えられない。神経系で例を挙げると、一つの神経細胞は、シナプスを介して多数の神経細胞から入力を受け、それらが条件に合えば自分自身も興奮現象を示し、また次の神経へと伝えていく。この総合入力の条件として、現在までに様々な説がある。以前は各入力の加算が条件である、と言われてきたが、最近はそのに加えて各入力のタイミングが重要、という説が有力になってきている。このように、各々の信号の持つ時間情報というのは、CPUを持たない生物の情報処理系が、各々、自律分散で情報処理を行なうにあたって陽に用いられていると考えるのが妥当であろう。ここでは、時間情報を陽に含んだ処理について、興奮場上でどのような形で実現され得るかを示す。

4.1 時間差検出1

先の論理積回路での入力の時間差検出という機能を主目的に形状を設定すると、次の様になる。

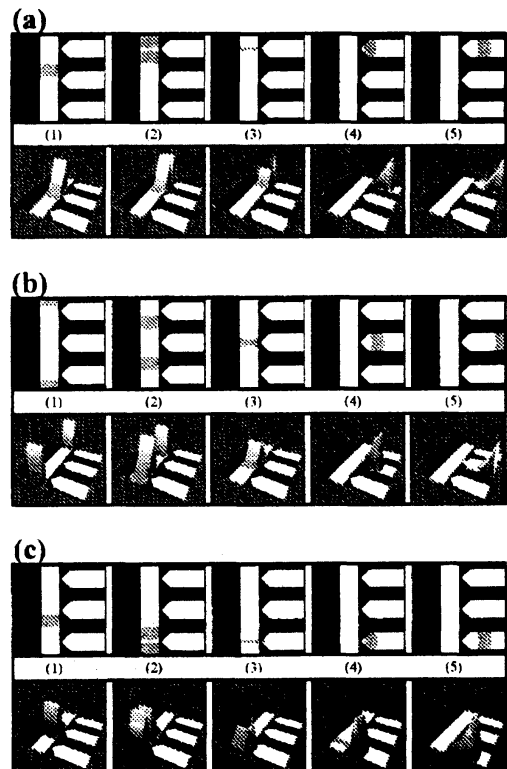


図5: 時間差検出回路。上端と下端から入力され、右側に出力される。入力同士が、(a)は上方の、(b)は中央の、(c)は下方の、出力先の付近で衝突した場合、それぞれの出力先に伝播することを示している。なお、それ以外のところで衝突した場合は興奮波は消滅する。

この素子では出力先を3つ設置してあるが、論理積素子と同じメカニズムで特定の時間差を持った入力のみを検出できることがわかる。これは、例えば生物は聴覚の定位のメカニズムなどとの関連が考えられる。

ここで、図5ではパターンの時間差を検出しているが、二つの入力が各々の出力先付近で衝突したとき以外は興奮波は伝播しないので、より連続的な時間差を検出するには不適當といえる。

4.2 時間差検出2

先の時間差検出では向かい合って進む二つの信号のタイミングを計るものであったが、ここでは同方向に進む二つの信号の間隔を測るための形状を考える。上端から続く場が入力場であり、入力信号は上方向から入る。右端に続く場が出力場であり、入力場と出力場の間に処理場が配置される。この演算では、上端から続く入力場から複数の興奮波が入力され、それらの入力興奮波の時間差が特定の時にのみ、出力場に興奮波が伝播する。

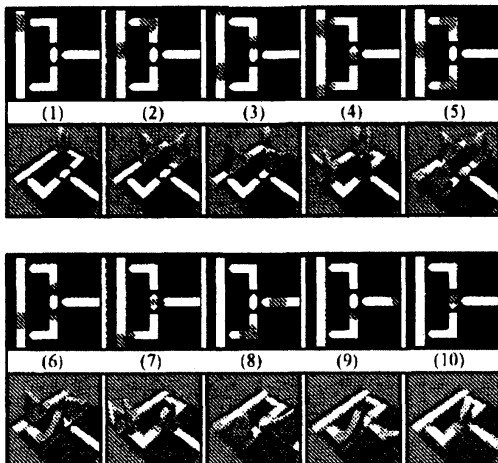


図6: 時間差検出回路。上端から二つの信号がから入力され、右側に出力される。入力の間隔が場として設定した適当な間隔であった場合にのみ、出力先に伝播することを示している。なお、それ以外間隔の場合は右端には出力されない。

4.3 メモリ

興奮波の存在とタイミングを情報とした場合の、情報蓄積・取り出しを目的とした形状を作製すると、次の様になる。

図7では外部からの信号が環状の興奮場を回りつづけ

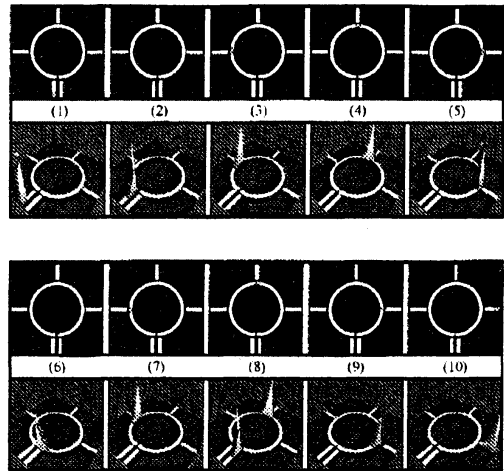


図7: メモリ。左下端から信号が入力され、環状に回ることによって参考信号が入力されるまで保存される。右下端から参考信号が適当なタイミングで入力されると、右、上、左部の出力先のいずれかに出力される(図の場合は右部)。

ることによって保存され、特定のタイミングで参照信号が入力された場合にのみ出力される機能をもつ形状を示している。ただし、信号が環状場を進行するにあたって、波を保つために適当なエネルギーを必要とすることから、実際の生物がこのようなメカニズムを情報の蓄積として用いているとは考えにくい。

5 多数値演算

以上で述べた、興奮場を用いた情報処理演算系は、出力を行うために入力に対してある時間条件を課しているとはいえ、出力としての情報表現は1/0のデジタル型のものであった。一方、生物が行っている情報処理系では、興奮現象が起こるか否かといったデジタル的なものと、刺激がどのくらいかというアナログ的なものを組み合わせで使っているように見えることが現在までに知られている。また、例えば感覚神経の末端などでは、外部からの刺激の強度に応じて、応答する興奮波数が異なることも知られている。本章では、場の性質そのものを興奮系と振動系その両方を兼ね備えたものに拡張することで、応答の強度が興奮波の自然数の値で表されるものに拡張できることを示す。

5.1 モデル方程式

情報の興奮系における表現に、波数という形で強度情報が含まれるならば、演算処理の自由度はさらに広がる。

その例として、図4の論理積演算素子で示した形状において、異なる処理が考えられることについて挙げる。前述した演算では、出力は、二つの興奮波が出力場付近で衝突するか否かの all-or-none で表現された。ここでは、興奮波の衝突箇所を1か0かの二値演算で検出するのではなく、より情報量の多い多値演算で検出することを考える。図4の形状において、上下から入力された信号が経路上で衝突すると、衝突した部位が出力場の先端（検出部分）に近ければ近いほど、検出部分に到達する活性因子 u の拡散量は大きい。この拡散量に依存して検出部分で引き起こされる興奮波の数が異なるというメカニズムを考える。より簡単には、興奮性と振動性の両方を合わせ持ち、振動の大きさに応じて両方を行き来するような方程式が考えられる。

$$\begin{cases} \tau \frac{\partial u}{\partial t} = -\gamma\{ku(u - \alpha)(u - \beta) + v\} + D_u \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} = \gamma u - \eta(\beta w^3) \\ \frac{\partial w}{\partial t} = -\eta\{\epsilon \tanh(\lambda u - kv - w)\} \end{cases} \quad (2)$$

図4の入力場に近い部分、右端からのびる場の先端部分（検出部分）が式(2)で記述される系を考える。なお、他の部分の場の性質は図4と同様とする。そして上下端から出力される信号の時間差について、それぞれの部位で衝突する場合の出力場への興奮波の応答をみる。

結果として、前節で述べた時間差は離散的な差のみが検出可能であったが、ここでは連続的に時間差を、応答波の数として検出できることがわかる。

5.2 多値演算

興奮波の波数が情報として考えられる系について述べた。したがって、情報処理系として、さらに多様な演算が考えられる。本節では、波数という多値情報が2方向から入力されるという前提の下で、基本的と考えられる演算、大小比較検出と差分検出について述べる。

5.2.1 大小比較検出

入力強度の大小比較検出素子では興奮場及び拡散場は図9のように設定した。図9の形状では、上下端から続く二つの場が入力場であり、入力信号はそれぞれ上下、両

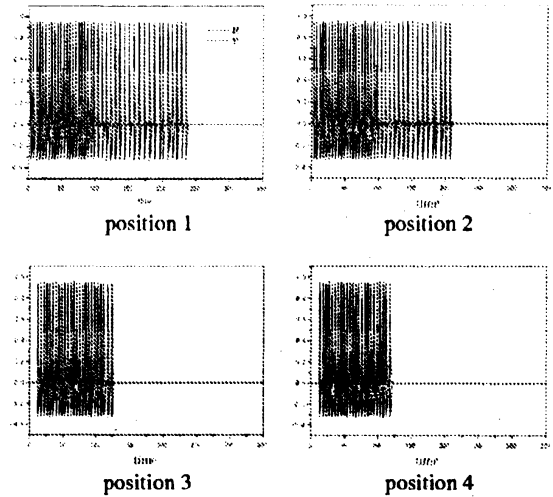
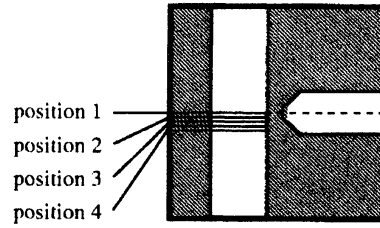


図8: 基本的には興奮場と拡散場の設定は論理積と同じ。加えて図の形状で中央の右端に続く場の左端、ダイオード形状部分の先端が上の方程式で記述される。上下からの入力の衝突部位に応じて、出力場での興奮波数が異なる。

方向から入る。左右端にそれぞれ続く場が出力場であり、入力場と出力場の間が処理場である。

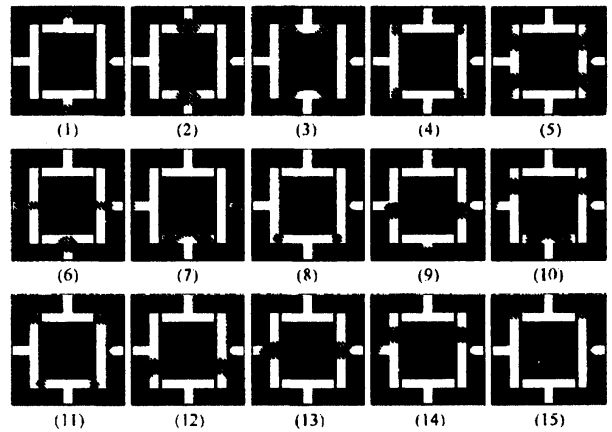


図9: 大小比較検出。上端から興奮波が1回、下端から3回入力される。中央での処理の結果、右端には少ない方の波、1回が、左端には多い方の波3回が出力される。

この演算では、上下からそれぞれ信号が波数という形で強度情報を携えて入力する。そして処理場を経て、波数

の多い方が左側の出力場へ、少ない方が右側の出力場へと伝播する。

5.2.2 差分

次に信号強度の差を検出することについて場の形状条件を考える。入力強度の差分検出素子では興奮場及び拡散場は図 10 のように設定した。この形状では、左端から続く二つの場が入力場であり、入力信号はそれぞれ入る。右端に続く場が出力場であり、入力場と出力場の間が処理場である。

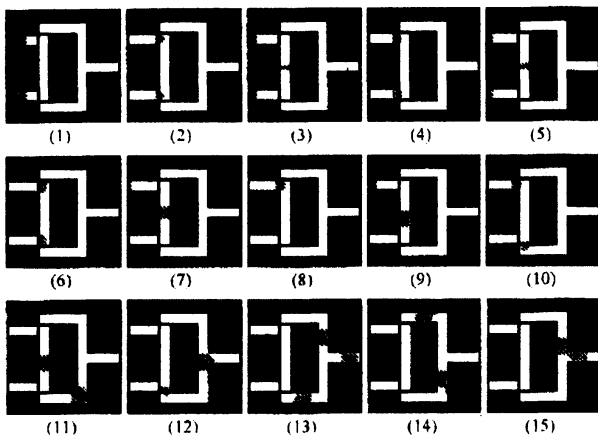


図 10: 差分検出。左上端からは興奮波が 5 回、左下端からは 3 回入力される。うち 3 回は中央で衝突して消滅し、結果として出力場には 2 回の波が伝播する。

この演算では、上下の入力場からそれぞれ信号が波数という形で強度情報を携えて入力する。そして処理場を経て、波数の差の分だけ、興奮波が右側の出力場へと伝播する。

6 考察及びまとめ

本研究において、反応拡散場の形状のみを変化させることによって、ダイオードや論理演算素子、メモリ等を作製することができた。さらにこれらの演算は同時に、入力の連続的な時間情報に強く依存していること、つまり連続時間情報を扱える系であることがわかった。また同期・時間差検出としての機能を持つ素子も作製可能であることもわかった [4, 5]。さらには、用いる興奮系を拡張することで、情報表現を 1/0 二値系から多値系への拡張が可能となり、より連続的な時間差検出や大小比較・差分等の演算が可能となることを示した。場の形状 (結合

の非対称性) で演算の種類を変えられること、参照クロックなしで演算できる可能性があること、及び動的な時間特性を積極的に利用していることは従来までの研究にはない視点であり、興味深い点だと言える。

現在の神経研究の流れの一つとして、入力の同期が重要 [3]、という説が最近有力視されてきている。また、形状という視点については、最近神経細胞の樹状突起の形状が情報処理に大きな役割を果たしているという報告もあり、本研究との関連も考えられる。

生物の行う情報処理は、同じ回路で環境に応じて異なる演算を行ったり、また回路自体を履歴によって変える自己組織的な性質をもつ。これは生物を特徴付ける重要な性質である。前者に関しては、上述した興奮場を用いた演算の系では、同じ形状の素子であっても活性度や、拡散係数が変わることによって、信号の伝播状況が異なるのは興奮場 (反応拡散場) という性質からは明らかであり、このような性質は生物における各種伝達物質 (メッセージャーやホルモン等) の役割と対応させることができると考えられる。また、後者に関しては、ここまで場の形状を初めに固定して与えていたが、信号応答の履歴に依存して自らの場・境界等の性質を決定するモデルがひとつのアプローチとして考えられ、現在取り組んでいるところである。

参考文献

- [1] "Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane," R. FitzHugh, *Biophys. J.*, 1, 445-466 (1961).
- [2] "Chemical diode" K. Agladze, R. R. Aliev, T. Yamaguchi and K. Yoshikawa, *J. Phys. Chem.*, 100, 13895-13897 (1996).
- [3] "Dynamics of neuronal interactions in monkey cortex in relation to behavioural events" E. Vaadia, I. Haalman, M. Abeles, H. Bergman, Y. Prut, H. Slovin and A. Aertsen, *Nature*, 373, 515-518 (1995).
- [4] "Real-Time Memory on an Excitable Field" I. N. Motoike, K. Yoshikawa, Y. Iguchi and S. Nakata, *Phys. Rev. E*, 63, 036220 (2001)
- [5] "Information operations with an excitable field" I. Motoike and K. Yoshikawa, *Phys. Rev. E*, 59, 5354-5360 (1999).