

氏名(本籍)	塚田 稔(長野県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博第279号
学位授与年月日	昭和46年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)電気及通信工学専攻
学位論文題目	神経系の情報伝送に関する研究

(主査)

論文審査委員	教授 佐藤利三郎	教授 田崎 京二
	教授 大泉 充郎	教授 松尾 正之

論 文 内 容 要 旨

第1章 序 文

生物神経系の情報伝送と処理の研究にあたり、その対象となる生物神経系の特殊性を理解し、神経系の情報伝送と処理の機構を明らかにするために神経系の信号すなわち神経インパルスを電子装置を用いて計測することが必要である。これを定量的に取り扱うために、統計的、確率的処理方法が用いられる。これらの生体測定や処理技術をもとに神経系のシミュレーションを行ない、工学的手段を用いて神経のモデルを考え、その性質を明らかにする研究方法も盛んに行なわれている。この種の研究の意義はモデルを通して明らかにされた事実にもとづき、生体内での可能性を推測することにより、生理学の研究へフィードバックするとともに、新しい情報処理装置の開発および生体特有の機能を有する工学装置の開発など情報伝送、処理工学および生体工学の分野に役立つもので

ある。

第2章 神経生理現象とそのモデル

生体内部で情報伝送および処理を行い、ひとつの生体現象の系を構成している神経系の基本的構成単位となるのが神経細胞（ニューロン）である。この章では、神経細胞の性質を理解するとともに、生体現象と工学的モデルとを関連させながら、神経系の情報伝送および処理の機能を把握する。筆者は高速度パルス伝送の立場から「分布定数線路とエサキダイオードを用いた神経モデル」を構成し、その特徴について検討したので、ここで取り上げて紹介した。分布定数線路にエサキダイオードを装荷したパルス伝送用アクティブ線路との関連において研究されることが期待される。

以上第2章では、神経生理現象とその工学的モデルについて検討を加え、モデルの設定の手法を明らかにするとともに、生体現象の解析と工学的解釈とが相伴って進められるべきであることを示唆した。

第3章 インパルス時系列の処理方法

電極や種々のトランスジューサを生体に挿入して得られる生物神経の現象を長時間にわたって神経インパルスとして観測するとき、そのインパルス時系列の特徴を抽出することが必要である。そのためには生体現象の特殊性を良く理解してインパルス時系列を処理しなければならない。インパルス時系列の処理は、基礎医学や生物学の立場から生体の機構や特徴を究明する重要な手段となる。一方工学的立場では生体に似た機能を工学的システムに取り入れるための手段となる。この章では統計的解析の前提条件となる定常性について述べ定常性の仮定のもとに、インパルス時系列の観測値を統計的、確率的に処理するための手法について検討した。相続くインパルスの間隔が独立の場合には、間隔ヒストグラム法により、その時系列の性質が明らかにされるが、独立でない一般の場合には、間隔ヒストグラム法が時間関係の情報を失うことに問題がある。この時間従属性を調べる方法として、

- 1) 相続くインパルスの系列相関係数を調べる方法
- 2) スケール変換された間隔ヒストグラムによる方法
- 3) ジョイントインターバルヒストグラムによる方法

などの有効性について検討した。

第4章 ザリガニ触角求心性神経におけるインパルス時系列

実際の神経系のインパルス時系列をザリガニ触角の求心性神経線維で測定し、その時系列の特徴

を解析した。ザリガニ触角の機械力受容器 (mechanoreceptor) には自発放電が存在し、その時系列の間隔ヒストグラムは P 分布型となる。自発放電の原因は二つ考えられる。

一つは、フィードバック回路網の存在によるもので他方は熱雑音によるという考え方である。ザリガニ触角の組織学的所見からフィードバック回路網の存在を考えるのは困難であり熱雑音に原因した自発放電であると考えるのが合理的である。この自発放電について、その温度変化による影響を調べた結果、生理的な温度範囲では

- 1) 温度の上昇とともにインパルスの平均頻度が単調に増大するもの
- 2) 30℃近傍で最大頻度に達し、さらに温度を上昇すると頻度の減少するもの

など大別して4つのタイプに分けられる。ザリガニ触角の感覚受容器は機械的刺激に応ずるばかりでなく、温度変化に対しても著しい影響を受けることからザリガニ触角の感覚受容器は機械力受容 (mechanoreception) の性質と熱受容 (thermoreception) の性質を兼ね備えていると推測される。同時に、温度変化のインパルス時系列のなかには、インパルス対の存在する特殊な時間関係の時系列が存在した。この時系列の情報伝送上の意義は、早急に断定することはできないが、第5章のシナプス伝達シミュレーションによれば伝達されやすいインパルス時系列の時間構造が明らかであるからこのインパルス対をもつ時系列の時間構造が伝達されやすいと推測される。次に短い期間の機械刺激をザリガニ触角感覚毛にあたえその単一感覚毛のインパルス応答を記録するための刺激装置を工夫した。これは、圧電材料を用いて電気的パルスを変位の大きさに変換し、微小ガラス管を介して単一感覚毛を刺激する方法である。この刺激装置を用いて単一感覚毛を刺激し、その応答を記録した結果、比較的順応の速い相動性応答 (phasic response) と比較的順応の遅い緊張性応答 (tonic response) の二種類の応答が存在し " phasic response " は伝導速度の速い神経線維を、" tonic response " は遅い神経線維を伝導することが明らかとなった。このことは神経線維の伝導速度の相違が情報伝送の機能の上で異った機能に対応していることを意味する。以上この章では実際の生物神経のインパルス時系列について研究を行なった。

第5章 デジタルコンピュータシミュレーションによるシナプスモデルの入出力の解析

この章では生理学データにもとづいて、デジタルコンピュータを用いてシナプスのシミュレーションを行い、そのモデルの入出力の統計的、確率的解析を試みたものである。シナプス入出力解析は、次のような観点から行った。シナプス後スパイクの発生は、シナプス前インパルスのいくつかの時間パターンを評価して二者択一を決める決定機構であり、スパイクを発生するか否かを連続

的に評価している。

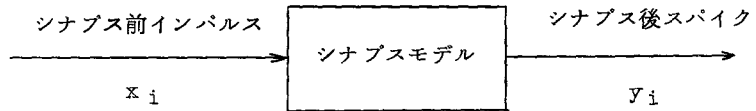
シミュレーションの結果次の事が明確となった。

(1) シナプス後スパイクの発生に影響するシナプス前インパルスの時間パターンが明らかとなった。さらにシナプス後スパイクの発生に影響するシナプス前インパルスの時間パターンの個数は3~4個のインターバルパターンが重要である。(ただし、EPSPの振幅が静止閾値の $\frac{1}{2}$ 近傍の場合)

(2) シナプス前インパルスの時間パターンがシナプス後スパイクの発生に影響するが、その影響の仕方は静止閾値に対するEPSPの振幅の変化によって異ってくる。EPSPの振幅が小さい時はシナプス前インパルスの特定な時間パターンに集中してシナプス後スパイクが発生する。EPSPの振幅が大きくなると特定な時間パターンに集中せず、シナプス後スパイクの発生は、シナプス前インパルスの時間パターンに依存しなくなる。

(3) シナプスの情報処理機能を定量的に評価できる入出力の統計的、確率的解析方法として、情報理論にもとづいた観測の理論が有効に適用できる。

Fig. 1 シナプスモデルの入出力の定義



確率 $P(x_i)$ $P(y_j/x_i)$ $P(y_j) \begin{cases} y_0 \dots \text{不発火} \\ y_1 \dots \text{発火} \end{cases}$

情報理論の諸式

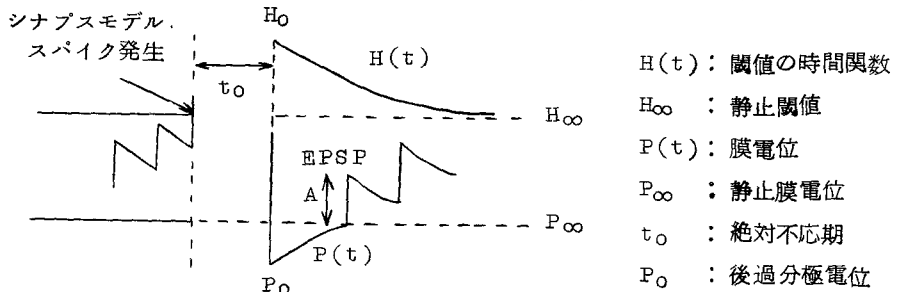
$$H(X) = -\sum_i P(x_i) \log P(x_i) \dots\dots\dots(1)$$

$$H(Y) = -\sum_{j=0}^1 P(y_j) \log P(y_j) \dots\dots\dots(2)$$

$$H(Y/x_i) = -\sum_{j=0}^1 P(y_j/x_i) \log P(y_j/x_i) \dots\dots\dots(3)$$

$$H(Y/X) = -\sum_i H(Y/x_i) P(x_i) \dots\dots\dots(4)$$

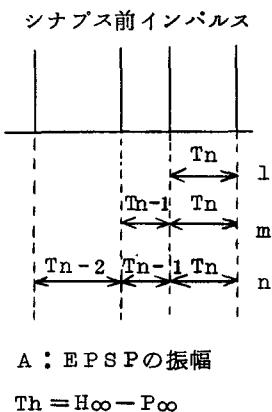
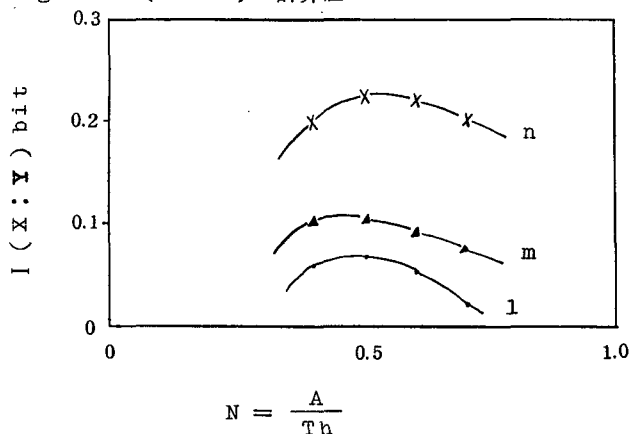
$$I(X:Y) = H(Y) - H(Y/X) = H(X) - H(X/Y) \dots\dots\dots(5)$$



(a) シナプス後スパイクの発生に影響するシナプス前インパルス時間パターンインターバル個数は、 $H(Y/X)$ の減少が飽和に達した時の個数で評価できる。

(b) 一定の入力分布を与えたとき、EPSPの振幅の変化に対するシナプスの情報処理機能の比較が可能である。すなわち入力エントロピー $H(X)$ が一定であるからEPSPの振幅の変化に対するシナプスの時間パターン処理機能の比較が $I(X:Y) = H(X) - H(Y/X)$ の値によって評価できる。

Fig. 2 $I(X:Y)$ の計算値



(c) 同様にしてシナプスモデルの相違による時間パターン処理機能の比較が可能である。

第6章 ニューロン回路網への考察

シナプスモデルは生理系に近いモデルから、抽象的なモデルに至るまで様々存在している。このモデル間の時間パターン処理機能を比較するために第5章で適用された情報理論にもとづいた観測の理論を用いて比較検討した。この結果、生理系に近いモデルはEPSPの振幅の変化に対しシナプス前インパルス時間パターンの処理機能を一定に保持しようとする働きがある。これは相対不応期の存在と後過分極(after-hyperpolarization)の存在とによってなされていることがわかる(Fig.3)。比較的EPSPの振幅が小さい時は、モデル間の時間パターンの処理機能に大きな差は認められないがEPSPの振幅が大きくなるとその相違が著しい。このことは、EPSPの振幅が静止閾値に対し比較的小さいと仮定した時は、抽象化したモデル(相対不応期または後過分極の存在しないモデル)でも、神経細胞の時間パターン処理機能を代表できると解釈される。

次に神経系に存在する収斂の回路網について情報伝送と処理の立場から解析を行なった。この回路網の出力は入力の一神経線維のインパルス時系列の平均インターバルに収斂する(Fig.5)。

Fig. 3 シナプスモデル間の平均相互情報量の比較

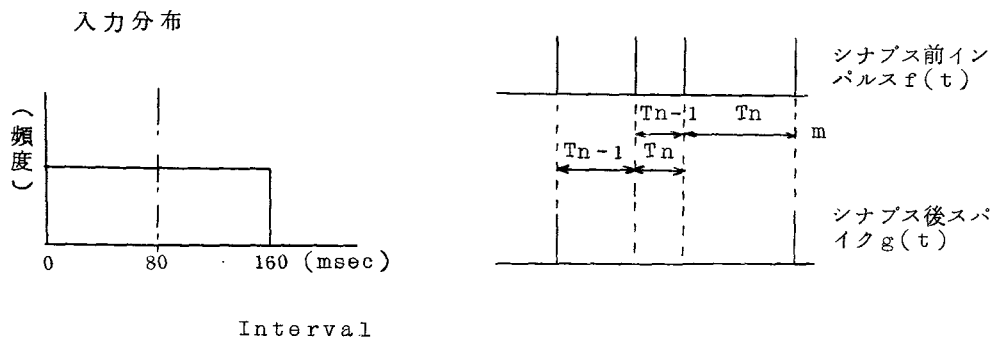
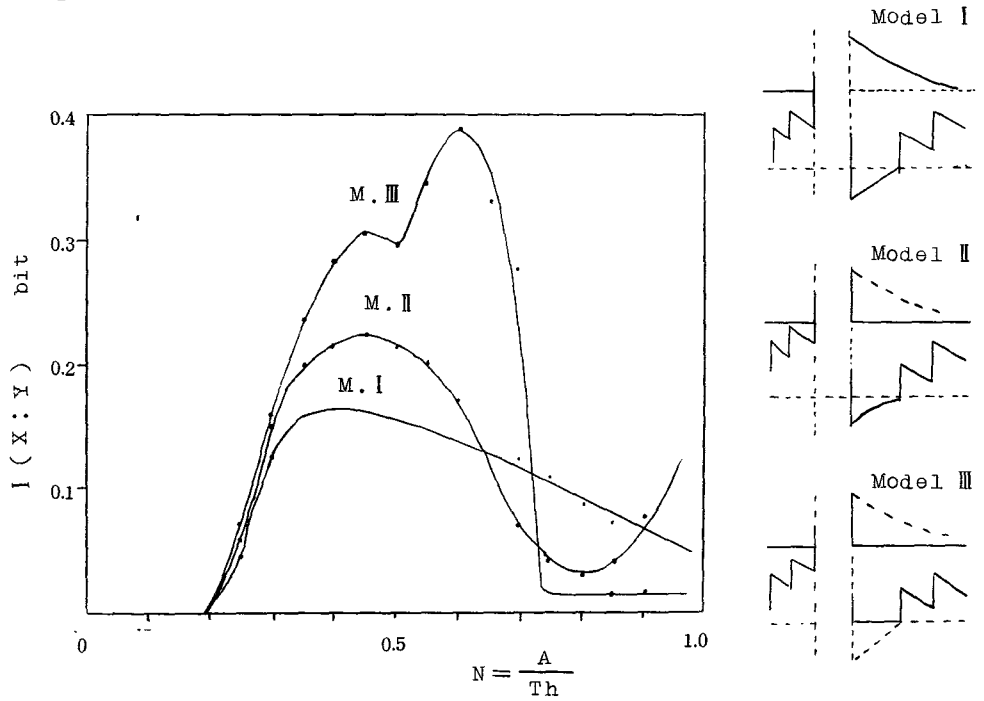


Fig.4 収斂の神経回路網

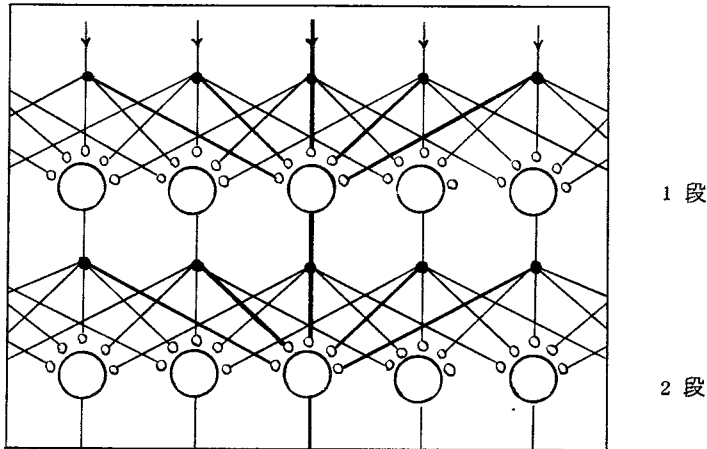
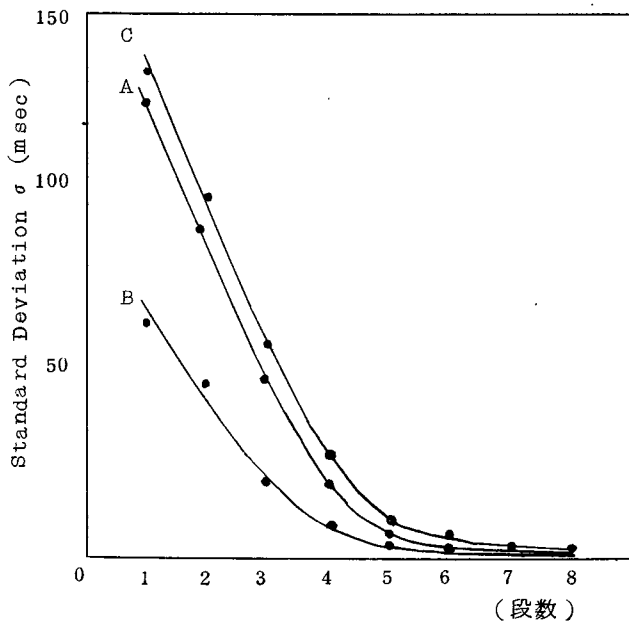
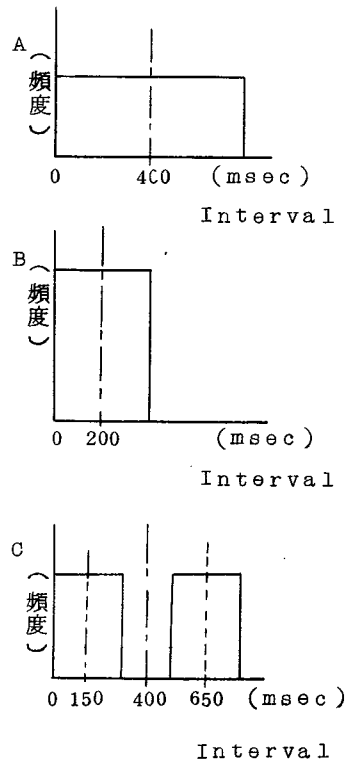


Fig.5 各段の単一神経線維でのインパルス時系列の標準偏差



入力分布



第7章 結 論

以上，神経系の情報伝送と処理の機構を生物神経の実験と工学的モデルによるシミュレーションによって研究を行った。この研究結果が生理学ならびに情報伝送，処理工学さらに生体工学の分野での発展に寄与することを期待する。

審 査 結 果 の 要 旨

情報伝送工学の分野において、生物の情報伝送と、情報処理の機構の解明が注目されている。しかし、生物神経系の情報の伝送、及びその処理は著しく複雑であり、定量的にこの現象を取扱うことは困難である。ゆえにこの方面の研究には、種々の方向、方針が考えられていて、未だ確定した手法はない状態である。著者はこの複雑な生理現象を、情報伝達及びその処理の立場から研究を行ない、医学的手法による神経系内のインパルスの測定、その測定法の研究を行ないつつ、種々の実測結果を統計的、確率的手段で整理し、更にそれらの確率的、統計的結果をもとにし、電子計算機を用いて神経の情報伝達、及びその処理の性質をシミュレートし、その性質を定量的に明らかにすることを試みた。

本論文はこれらの研究をとりまとめたもので、全編7章よりなっている。

第1章は序論であり、本論文の目的と本論文に関連する研究を述べている。

第2章では、生体や生体現象の生理学的事実を調査し、それらの種々発表されている神経モデルについて概説し、著者の考案になる分布定数線路とエサキダイオードを組合わせた、工学的シナプスモデルについて述べている。

第3章では、従来とられて来た神経インパルス時系列の統計的解析法の手法について概説し、神経インパルスの時間に対する従続性と独立性を解析する有効な手段であるが、未だ定量性に欠ける点のあることを述べている。

第4章からは著者の研究の主体であるが、まず第4章では、ザリガニ触角の求心性神経繊維のインパルス時系列の測定法並びにその測定を詳述し、無刺激の場合のインパルス時系列が、温度によって著しく変化し、その時系列分布が数種の分布型に分けられることを示し、又、圧電材料を用いた刺激法を開発し、単一感覚毛を刺激し、それによって生ずるインパルス時系列の正確な実測結果を示し、第3章の手法を参照してインパルス時系列の確率分布形を明らかにしている。

第5章では、情報理論を用いた情報伝達、処理の作用を定量的に示す方法を述べ、第2章で述べた生理学的モデルに、第4章で得られたインパルス時系列を加えたときのシミュレーションを、電子計算機を用いて数多く行ない、シナプスの状態によって、伝達を主とする場合、処理機能を主とする場合の両特性のあることを定量的に明らかにする手法を述べている。

第6章では、生理的に近いシナプスモデルから抽象的モデルの三種について、第5章と同様のシミュレーションを行ない、各モデルの情報伝達及び処理機能の差異を量的に明示する手法を述べている。又、神経回路網についてシミュレーションを行ない、入力パルス系列からの情報抽出の状況を明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに，本論文は，神経インパルスの測定及びその統計的処理法を述べ，それらを基礎として，シナプスモデルを用いて，神経系の伝送と処理の機構を，シミュレーションによって究明する新しい方法を述べたもので，通信工学並びに生体情報工学に資するところ少なくない。

よって，本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。