

氏 名	うじ はら じゅん いち 氏 原 淳 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和52年5月11日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和31年3月 東京工業大学理工学部電気工学科卒業
学 位 論 文 題 目	音声信号処理を目的とした聴覚神経系モデル構成の研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 城戸 健一 東北大学教授 佐藤利三郎 東北大学教授 松尾 正之 東北大学教授 野口 正一 東北大学教授 田崎 京二

論 文 内 容 要 旨

本研究は、大脳皮質に至る聴覚神経系の空間的な情報処理過程の全体的な把握に焦点を合わせ(1章)、神経生理学の知見(2章)に基づいて、聴覚神経系のモデルを構成し(3章)、モデルにおける信号の振舞(4章)から、目的とする神経系の音声を含む音響信号の処理機能を説明(7章)し、その結果が人間の聴覚について知られている実験的事実のいくつかと符号することを示したものである。同時に、このモデルによって聴覚心理上の重要な概念の一つである臨界帯域幅を生理的構造と関連づけて説明した(5章)。また、モデルの特性を、聴覚心理上の属性によって規定することにより、生理現象に基盤をおくモデルの正当性を聴覚心理的にも裏づけた(6章)。

まず、聴覚神経系モデル構成の考え方、電子回路モデル化のさいの種々のパラメータの選び方、

構成各要素の内容について述べ、最後にモデルに対する本質的要求が満たされていることを示した(3章)。

モデルは前処理、基底膜、有毛細胞層、1次、2次、3次ニューロン層からなっている。ニューロンモデルには神経系の基本的な機能である側抑制作用を与えている。すなわち生体ニューロンで観測される抑制野特性をシミュレーションするよう、空間的側結合をニューロンに与えている。上位のニューロン層ほど過渡的な応答をするニューロンが増加する神経生理的知見に対応して、1次、2次ニューロン層は、持続形のニューロンで構成したのに対し、3次ニューロンは順応形ニューロンとした。ニューロンのチャンネル数は、一つの臨界帯域に約2ケのニューロンを割当て、全体で48チャンネルとした。

つぎに、比較的単純な信号音によって聴覚神経系の基本的な情報処理機能を明らかにした。信号音としては純音、雑音、振幅変化音(AM音)、周波数変化音(FM音)のほかに、純音—純音、純音—FM音からなる複合音を用いて、その応答を調べた。特に複合音に対して神経系の独自の情報処理機能が発揮されることを解明した(4章)。

ニューロンは、空間的シャープニングと時間的シャープニングの二種の情報処理機能をもっている。前者は、純音応答に典型的に見られるもので、1次から3次ニューロンへ経過するにつれて、応答が入力信号周波数に対応する特徴周波数をもつニューロン群へ集中してゆく作用である。後者は、特に順応形ニューロンにおいて顕在化し、振幅変化音に対する応答などのように、前層応答より、その継続時間が短縮化する作用である。そのため階段状に振幅が変化する音の場合、順応形では、応答が時間的に前後に分割化される。以上の結果は、振幅が変化する音や、周波数成分が変化する複合音に対して、聴覚神経系が、上位ほど、その応答を、空間的にある場所に集中させ、同時に時間的に分割してゆくように作用することを示唆している。この結果は振幅や周波数が変化する音と定常的な音とに対する聴覚反応の差異をよく説明するものである。

ついで、以上のように構成したモデルによって聴覚神経系における音声信号の処理過程を検討した(7章)。対象とした音声サンプルは定常母音、および母音性連鎖音である。

基底膜は、低域通過形の特徴をもつため、入力音声におけるピッチ波形やそのエンベロープは、基底膜のどの場所でも、ほぼ原波形のまゝで伝達される。さらに次層の有毛細胞でも、数m sec.の時定数をもっているだけであるから、上記の時間変動は保存されて、1次ニューロン層に伝達される。

母音のホルマント成分に対応する応答が、ホルマント周波数を特徴周波数とするニューロンを中心に、空間的に山形のパターンとして数個生じ、1次から2次、3次ニューロン層へ進む

につれて、空間的シャープニングにより、応答が集中してゆく。その際でも、それらのニューロンにおいて、入力音声のピッチやエンベロープの時間変動は、ほぼ保存される。また、もし二つのホルマント成分の周波数間隔がニューロン層の周波数分解能以内になるとき、応答は融合して一つの山形応答となる。さらにホルマント移動に対応して、空間的に移動する応答が生じる。

順応形3次ニューロン層に進むと、時間的シャープニング効果によって、入力音声エンベロープの谷ごとに応答が時間的に分割されてゆく。このように分割時点は音声のエンベロープの谷に対応することが多いが、その他に、各ホルマント成分の振幅変化、周波数変化による分割が付加されることもある。このように分割された応答区間は、母音定常区間、母音区移遷間とかなり対応しているが、対応づけのより詳細な検討が必要であり、今後の課題である。

また、ピッチ情報は、ピッチ周波数に対応した特徴周波数をもつニューロンはもとより、ホルマントに対応した場所のニューロンにおいてもピッチ周期で交番する脈流信号として伝達されていることが分り、このような現象が生じる原因をモデルによって解明した。さらにこの現象は後に生理実験で実証された。

以上の検討から、聴覚神経系の上位へ進むにつれて、連続した入力音声信号が、時間的・空間的に分割された離散的の信号に変換され、ピッチ情報はその離散的の信号に重畳されて伝達されてゆくものと云える。

また、聴覚心理で重要な概念である臨界帯域というモデルに対して聴覚神経系のモデルを用いることによって、その生理学的な機構を推定することを試みた(5章)。マスキング量が神経の興奮の程度を表わしていると仮定すると、二つの純音によるマスキングパターンと神経モデルニューロン層の二音応答パターンとが対応づけられ、臨界帯域幅は、ニューロンの側抑制特性を表わす応答野・抑制野における応答特徴周波数と抑制特徴周波数との間隔に対応する。すなわち、臨界帯域という聴覚心理上の概念は、生理的に側抑制機構によって生じる。

さらに、聴覚系の生理現象と聴覚心理現象とを対応づけることにより、神経生理学に基盤をもった聴覚神経系モデルの特性を聴覚心理的的属性によって定量化する二つの問題を扱った。すなわち、神経系の周波数分解能および神経系の感度特性の規定法について検討した(6章)。

前者については、臨界帯域幅に基いてニューロンの神経結合関数を定量的に規定した。この検討から、周波数分解能は主に神経結合関数の興奮-抑制間の距離に依存することを解明した。また基底膜のゆるやかな振動パターンから3/8オクターブのような狭い帯域幅の周波数分解能を得るために、神経層を多層構造とすることによって、その安定度を確保していたことが導かれた。

後者については、聴覚神経系の感度曲線を音の大きさに関するラウドネス等感曲線に基いて決めるように考えた。神経系の感度曲線は、ニューロンの応答野の谷に相当する入力レベルを各ニ

ニューロンの特徴周波数に対して連ねた曲線で表わすように定義し、この神経系の感度曲線を 30 Phon の等感曲線と同等の特性となるよう前処理回路の特性を決めた。この検討により前処理回路の特性は、神経系の感度曲線を規定するのみでなく、ニューロンの抑制特性をも規定することが分った。すなわち低域における神経系の感度の低下は、同時に低域成分からの抑制作用の低下をもたらす。したがって複合音に対するニューロン層の応答は、入力スペクトル構造に依存し、ニューロン系の感度特性と抑制特性の両特性に規定されて生じることが導かれた。

本研究は、従来のモデル研究が内耳や神経系への変換系に止まっていたのを、上位の神経系まで拡張し、かつ微視的な単一神経の振舞に止まらず、神経層全体の振舞を把握したもので、音響信号や音声に対する聴覚神経系の情報処理機能について体系的な説明を与えている。

第 4 章、第 7 章の知見は、生理実験では観察困難であるニューロン層全体の空間的振舞を示しており、聴覚生理学に示唆を与えるであろう。二、三の例をあげれば、

- (1) 同一形式のニューロンであっても、入力信号周波数と、CF との相対関係によって応答の振舞が変わってくる。
- (2) 二音に対するニューロン応答は、単音応答の加算とはならず、二音の周波数間隔によって急峻な分離、または融合現象を示す。
- (3) 複合音を構成する音の一つが、FM 音や AM 音のように時間的に変化する場、時間的に変化しない他の一音の応答にも時間的分割や逆相の振幅効果などの抑制効果があらわれる。
- (4) 過渡的な応答をするニューロンの本質的な特徴は、時間的シャープニング作用であり、順応形や ON 形ニューロンは、時間的シャープニングの強さの程度として、その処理機能が推定できる。
- (5) 振幅が変化する信号に対して、過渡的な応答をするニューロンは、振幅のピークを中心に分割するように作用する。

第 5 章の知見は聴覚心理学上の概念である臨界帯域と神経生理学上の側抑制作用との関連を、モデルによって説明を与えるものであり、モデル研究の手法が、聴覚生理的作用と聴覚心理的概念との関連解明に有効な手法であることを示している。第 6 章は、神経生理学に基づくモデルの特性を聴覚心理上の属性によって規定した二つの事例であり、心理・生理・モデル構築の三分野の知見が相互に補強しあいながら、研究を進展させてゆく姿を示している。

第 7 章は、また、音声物理学における音声の分析・特徴抽出について、神経系の処理形態の面からの知見を提供している。二・三の例を挙げれば、

- (1) 周波数分析能力は、神経系の周波数分解能で決まり、二つのホルマントの周波数が神経系

の周波数分解能以内に近接するとき、二つのホルマントとしては分離しない。これは、音韻識別上の興味ある結果である。

- (2) 過渡的に応答するニューロンが、主に連続した音声を時間的に分割する機能を受け持っている。
- (3) また、ホルマント移動および終了時点においても、抑制作用により応答が分割されることもある。(2)とあいまって、分割期間は母音定常期間、母音遷移期間にかなり対応している。
- (4) ピッチ情報は、場所の情報としてよりも、むしろホルマント周波数に対応する場所において、時間情報として伝達される。

以上の研究結果から、このようなモデル研究の手法が聴覚神経系の情報処理機能や機構の解明に有用な方法であることが実証されたのみならず、このモデルによって、神経生理学的には観測困難で、まだ十分な説明が与えられていない聴覚心理学的実験結果のいくつかに合理的説明を与えることが出来た。

審査結果の要旨

生体の聴覚系における情報処理の機序の解明は、工学的応用の立場から大いに期待されている。生体、特に人間の聴覚神経系における情報処理の過程を外部から観測することは極めて困難であるため、神経生理学的手段によって観測された神経細胞の基本的な応答特性をシミュレーションする電子回路を作り、その組み合わせによって作られる神経回路網のモデルの性質を調べ、神経系における情報処理の機序を推測するという研究手段がとられている。しかし、従来行われてきた少数の神経細胞の結合と単純な刺激を対象とした研究だけでは、聴覚系における音声信号処理の機序を推察し、工学的な応用を考えるためには不十分であった。本論文の著者は、この問題を扱うに足る聴覚神経系のモデルを構成することにより、聴覚系における音声信号処理の機序を明らかにすることを目的とした研究を行った。本論文は、その研究成果をまとめたもので、全文8章よりなる。

第1章では聴覚系の構造モデルの研究を概観し、本研究の意義と手法上の問題を述べ、第2章では聴覚系の生理的機構と機能について述べている。

第3章では、神経生理学的に明らかにされた知見に基づいて行った聴覚神経系のモデルの構成について詳細に述べ、このモデルが神経回路網としての基本的な性質を持っていることを示している。第4章では、この回路網の情報処理機能を、比較的単純な信号音によって調べ、モデルが神経系に特有の処理機能をもつことを明らかにしている。さらに、第5章では、聴覚心理で重要な概念となっている臨界帯域がこのモデルで説明できることを示し、第6章では、聴覚心理学的属性に基づいて、モデルに持たせる諸性質を定量的に規定している。アナログ回路を用いることにより、比較的少数個の素子による構成で神経回路網全体の性質を表現できることを示したのは、本研究が最初であり重要な成果であるといえる。

第7章では、以上のように構成したモデルによって、聴覚神経系における音声信号の処理過程を検討し、聴覚系における周波数分析能力が主に神経系に依存する、また、ピッチは時間情報として処理されていると見るべきである、などという興味ある結果を得ている。

第8章は結論である。

以上要するに、本論文は、聴覚系における音声信号処理の過程を解明するための聴覚神経系のモデルを構成し、その有用なことを示し、聴覚系における音声信号処理の研究に新たな知見を加えたもので、情報工学並びに通信工学の進歩に寄与するところが少なくない。

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。