

氏 名	菅 原 研 次
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 58 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項
研 究 科, 専 攻 の 名 称	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 經 回 路 の 数 理 モ デ ル に お け る 力 学 系 に 関 す る 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 野 口 正 一
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 野 口 正 一 東 北 大 学 教 授 松 尾 正 之 東 北 大 学 教 授 木 村 正 行 東 北 大 学 助 教 授 原 尾 政 輝

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

生体の情報処理機能及び制御機能をになっているのは脳-神経系である。この脳-神経系の情報処理様式は未だほとんど解明されておらず、生理学、心理学、数学そして工学を含めた広い範囲の研究の重要な研究課題となっている。工学的立場から見れば、脳-神経系の柔軟で高度な情報処理メカニズムを明らかにすることは、並列処理などの新しい原理に基づく情報処理システムの構成の手掛りを得るために有効であると思われる。

本論文で扱う神経系のモデルは、生理学的知見に基づく厳密なモデルを構成するのではなく、神経系における情報処理機能に着目し、この面からとらえた基本的な神経系の性質を抽象化した数理モデルである。

脳-神経系を一つの情報処理システムとして考えると、この構造は比較的少数の等質の神経細胞からなる基本的な機能をもつ回路が構成され、更にこれらの回路が結合することにより上位の機能をもつ回路を構成し、またこれらが結合するという階層構造をとるものと考えられる。本論文では主にこの基本的な神経回路の構造と動的性質の関係を明らかにすることにより、神経回路が持つ基本的な情報処理機能を解明する。

神経回路の動的性質を記述する状態遷移方程式は、パルス頻度を情報信号とするアナログ神経回路については常微分方程式で表わされ、パルスの有無を情報信号とする離散神経回路においては差

分方程式で表わされるが、いずれも非線形方程式であるので方程式の解を完全に記述することは一般的には不可能である。Poincare はこの非線形方程式の研究の一つの限界に対して、解の定性的な性質を調べることにより常微分方程式の新たな研究分野を切り開いた。すなわち“平衡状態と周期解がどのくらい存在するか”とか“時間を正または負に十分大きくとるとき解はどのような行動をするか”などの定性的問題を明らかにすることにより常微分方程式の解の性質を知ることができると考えた。この方向はBirkoff等によって継承され位相力学という分野が生まれた。本論文でもこの立場でアナログ神経回路、離散神経回路の動的性質を位相力学としての面からとらえる。

更に神経系の持つ一つの特性として、細胞の老化や環境の変化による神経系の構造の変化に対しても、その情報処理機能は安定して作用するということがあげられる。本論文では神経系のもつこの性質を、神経回路の数理モデルの力学系における構造安定性の問題としてとらえ、これに関する必要十分条件を与えている。

以上のことをふまえ、本論文では、(1)アナログ神経回路の単安定性、多安定性、構造安定性、(2)離散神経回路の力学系の分類、などの問題を論ずる。

第2章 神経回路の数理モデル

本章では離散神経回路とアナログ神経回路の状態遷移方程式を定義し、神経回路の動的性質を調べるための準備を行う。

離散神経回路はMcCulloch-Pittsにより提案された形式ニューロンモデルを素子とする回路であり、信号はパルスの有無により0か1のいずれかの値をとる。各素子は同期的に状態遷移し、回路の状態方程式は差分方程式で表わされる。アナログ神経細胞モデルは、パルス頻度を信号とし、入力信号の空間的、時間的加算によりその素子の内部状態（アナログ量）が決定される。内部状態と出力パルス頻度の関係を与える出力関数は神経細胞の基本的性質である不応期により単調増加飽和形の非線形関数となる。本論文ではアナログ神経回路の動的性質の解析は、この一般的な単調増加飽和形の出力関数のもとで行うが、特に多安定性の解析の場合は区分線形関数を用いる。

第3章 アナログ神経回路の動的性質

本章ではアナログ神経回路の構造と動的性質の関係を与える。ここでは特に神経回路の動的性質を特徴づける、その力学系における極限集合であるところの平衡状態と周期解に着目する。神経系の情報処理においては、平衡状態は記憶や識別、概念形成に対応すると考えられ、また周期解は連想記憶や生体におけるペースメーカーに対応すると考えられている。

アナログ神経回路の重要な特性として、少なくとも一つの平衡状態が存在することがあげられる。従って平衡状態の個数により神経回路を分類することが考えられる。本章ではこのうちで最も基本的である平衡状態がただ一つだけ存在し、かつ任意の状態遷移が最終的にはその平衡状態に漸近するという大域的に漸近安定な平衡状態を持つ神経回路の構造を求めた。これによれば、各素子の間の結合が弱い、あるいは各素子間の結合が強い場合にはその回路に加えられる外部刺激が十分大きい場合にそのような回路は大域的に漸近安定な平衡状態を持つことが明らかになった

また神経回路における周期解の存在は従来厳密には証明されていなかったが、ループ状に結合された抑制性の神経回路（3素子系）において周期解が存在することの証明を行った。

第4章 区分線形出力関数の場合のアナログ神経回路の平衡状態

本章では、アナログ神経回路の多安定性について調べる。具体的には出力関数を単調増加飽和の特性を満足する最も基本的関数である区分線形出力関数にすることにより解析を簡単化し、神経回路の構造とその力学系に存在する平衡状態の個数の関係を調べる。解析の手法としては、出力関数が区分線形関数であることにより、 n 個の素子から構成される神経回路の状態空間 R^n を 3^n 個の領域に分割し、各領域で状態方程式を線形化することにより、平衡状態の個数を求めるアルゴリズムを与えた。

特に神経回路の構造が等結合であり、かつ回路の外部からの入力各素子に対して一様である場合について、具体的に平衡状態の個数を求めた。これによれば、興奮性の回路においては平衡状態の個数は高々3個（そのうち漸近安定な平衡状態は2個）であるが、抑制性の回路においては多数の平衡状態が存在し得ることが明らかになった。従って平衡状態の個数が神経回路の記憶容量や、概念形成における概念の数に対応すると考えれば、興奮性回路より抑制性回路のほうが情報処理能力において優れていることが予想される。

第5章 アナログ神経回路の平衡状態の構造安定性

神経系をとりまく環境の変化や細胞の疲労、老化等の影響に対して、神経回路モデルにおいては回路の構造を決定するパラメータが変化する。このパラメータの変化に対して、神経系の機能すなわち神経回路の数理モデルにおける力学系の性質が本質的な影響を受けないための条件を明らかにすることは興味ある問題である。

本章ではこの力学系の構造安定性の部分的な問題を扱う。すなわち力学系における平衡状態に着目し、パラメータの変化に対して平衡状態が連続的に変化し、分裂や消滅の現象が生じないということによって神経回路の平衡状態の構造安定性を定義する。

この定義により、一般的な構造のもとで神経回路の平衡状態が構造安定となるための十分条件を与える。この結果をもとに一様構造神経回路の一様平衡状態が構造安定となるための必要十分条件を与える。また出力関数を区分線形関数とした場合は、任意の結合構造のもとで構造安定性の必要十分条件が与えられ、構造安定な平衡状態の特性化がなされた。これについては逆の面からみると神経回路の平衡状態に関するカタストロフィー現象がある程度明確にされたことになり、学習や適応のモデルなどと考え合わせると興味深い結果であると思われる。

第6章 離散神経回路の動的性質

本章では巡回一様構造離散神経回路の構造とその力学系の関係を明らかにする。この回路の一様構造性と神経細胞の固有の性質である Dale の法則とを考え合わせれば、神経回路は興奮性回路と抑制性回路の二つに大別される。また回路の結合構造は等価的に局所関数、すなわちしきい関数で

表わすことができる。この神経回路の構造を与える局所関数が、ある変数の値に依存して関数の値が決定される場合にその依存のしかたにより4種類に分類することができる。

また十分時間が経過した後の回路の状態を終状態と呼ぶこととする。この場合終状態は平衡状態と周期系列に限られる。巡回一様構造離散神経回路が生成する力学系を、この終状態に着目して次の三種類に分類する。一つは終状態が平衡状態のみからなる力学系、次に終状態が周期系列のみからなる力学系、三番目は終状態が平衡状態と周期系列の双方からなる力学系である。本章ではこの力学系の分類と前に述べた局所関数の依存性による分類、興奮性と抑制性による分類との関係を明らかにした。依存性のない局所関数とその力学系の関係は本論文では扱わなかったが、3近傍局所関数の場合については、すべての局所関数とその力学系の関係を明らかにした。また巡回一様構造離散神経回路の平衡状態集合を導出するアルゴリズムを与え、4近傍以下の局所関数の回路について具体的に求めた。

第7章 結 論

神経系の情報処理機構を調べるためには、神経系の動的性質を明らかにすることが必要である。本論文では位相力学的立場から、神経回路の構造とその動的性質の関係を明らかにした。

アナログ神経回路については、大域的に漸近安定な平衡状態を持つ回路と、多数の平衡状態を持つ回路の構造について調べた。この結果興奮性回路より抑制性回路のほうが多数の平衡状態を持つことが明らかにされた。また構造安定な平衡状態の特性化がなされた。

巡回一様構造の離散神経回路については、その構造と力学系との関係を調べ、特に3近傍回路の場合はその完全な特性化がなされた。

以上のことは、神経系の情報処理機構や学習、適応の過程の研究を行ううえでの基盤になると思われる。

審査結果の要旨

情報化社会の進展と共に情報処理に対する需要は急速に増大し、要求される処理内容も複雑化、多様化している。これらの要求に応える高度な処理能力をもつ情報処理システムを構成するため、生体系のもつ並列処理、認識、学習等の優れた情報処理のメカニズムを究明し、その性質を情報処理システム設計に取り入れる研究が近年行われるようになってきた。

著者はこのような観点から、生体系の情報処理の中核である神経回路網の性質を調べるため、回路網の数理モデルを構成し、そのモデルについて回路網のもつ性質を理論的に解析し、その諸性質を明らかにした。本研究はその研究成果をとりまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では離散系神経細胞およびアナログ神経細胞のモデルについて述べ、それらの神経細胞により構成される神経回路の状態方程式を非線形微分方程式として導いている。

第3章では、アナログ神経回路のもつ解の安定性について考察している。まず大域的漸近安定の概念を導入し、アナログ神経細胞の出力関数をもつ特性に着目して、一般的な条件の下で解が大域的漸近安定であるための十分条件を与えている。さらにこの条件は出力関数が区分線形出力関数で表現され、回路が興奮性結合でかつ一様構造回路の場合には必要十分条件であることも示している。又平衡状態の存在性やループ状結合神経回路の周期解の存在性について厳密な証明を与えている。これらは重要な知見である。

第4章では、区分線形出力関数をもつ等結合回路について考察し、回路の構造と平衡状態の個数ならびに漸近安定性との関数を明らかにしている。これにより興奮性結合回路と抑制性結合回路の性質の違いを明確にしている。

第5章では、回路網の構造安定性の問題について考察し、一般の神経回路網が構造安定であるための十分条件を与え、ついで区分線形出力回路網の場合には必要十分条件を導いている。

第6章では、巡回一様構造の離散回路網の平衡状態集合について考察し、神経回路網の局所関数からこの集合を導くアルゴリズムを導出し、局所関数のクラスと回路網のもつ状態遷移との関係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、今後の情報処理システム構成の基礎となる神経回路網の性質を位相数学、オートマトン理論の手法を用いて理論的に解明し、数多くの興味ある結果を導き、この方面の研究に多くの重要な知見を加えたもので情報工学の発展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。