

氏 名	薫 岩 丈 介
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 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 網 に よ る 方 位 選 択 性 に 関 す る 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 阿 曾 弘 具
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 阿 曾 弘 具      東 北 大 学 教 授 澤 田 康 次 東 北 大 学 教 授 星 宮 望

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

大脳皮質の一次視覚野には特定の方位に対し選択的に反応する方位選択性ニューロンが存在することが明らかになって以来、一次視覚野の皮質構造が微小電極実験により多くの研究者によって研究されている。近年の光計測技術の急速な発展に伴い、より全体的な方位選択性の皮質構造が明らかになってきている。このような様々な生理学的実験により、一次視覚野の方位選択性皮質構造は微小電極実験より明らかにされた特徴やそれ以外の特徴を含む、非常に複雑な皮質構造となっていることが分かってきた。主な特徴として以下のようなものが上げられる。

- 皮質上のある方向に対し方位選択性が連続的に変化する領域の存在：線形領域 (linear zones)
- 方位選択性の方位が急激に変化する領域の存在：裂け目 (fractures)
- 周りで方位選択性が連続的に変化している点の存在：特異点 (singularities)

しかし、このような複雑な方位選択性の皮質構造が、どのようなメカニズムによって形成されるのかといったことは未だ明らかにされていない。これまでも、多くの研究者により異なる数理モデルを用いて研究されているが、方位選択性の形成のメカニズムを完全に説明する構成的なモデルはまだない。形成のメカニズムを明らかにするためには、単純なモデルによって自己組織化の直感的な理解を可能とすることが重要と考えられる。そこで本論文では、具体的な視覚刺激提示による方位選択性の自己組織化を形式ニューロンを構成要素とした神経回路網モデルを構成し、理論的に方位選択性の形成のメカニズムとその構造を明らかにしている。

### 第 2 章 神経回路網モデルの構成と基本方程式

本章では、神経回路網モデルの構成と動作の基本方程式を与えている。更に、モデルに含まれる未知定数間の束縛条件を妥当な仮定のもとで理論的に導いている。

神経回路網モデルは入力層と出力層から成り、各層は形式ニューロンによって構成されている。更に、抑制性の効果を考慮するために、抑制性ニューロンプールが存在する。入力層と出力層は興奮性シナプスにより結合され、抑制性ニューロンプールと出力層は抑制性シナプスにより結合されている。これらのシナプス結合強度を Hebb 則に従って変化させることにより、方位選択性が自己組織化される。出力層のニューロン間には側方結合が存在し、この結合強度は固定である。

学習が十分ゆっくり進行することを仮定した場合各入力パターンの提示順序に学習は依存しなくなり、学習方程式をアンサンブル近似によって近似することが出来ることを示している。学習が終了した学習の平衡状態での各シナプス結合を用いると、平衡状態での出力を与える方程式が入力パターンの空間相関によって特徴付けられることが示された。この平衡状態での出力方程式は非線形連立方程式によって与えられ、更に非常に多くの未知定数が含まれているため、実際に解を求めることが非常に困難である。この困難さを回避する一つの方法として未知定数間の束縛条件を導き、次章の数値実験を可能なものとしている。

### 第3章 視覚刺激位置を考慮した方位選択性

本章では、視覚刺激の方位と位置情報を同時に自己組織化するような神経回路網モデルを提案し、その妥当性を数値実験により明らかにしている。

これまでの研究は方位選択性のみ注目していたため、視覚刺激の位置まで考慮していなかった。しかし、実際の視覚情報の認知過程では、方位情報だけでなく位置情報も重要である。そこで、様々な位置情報を考慮するために、複数の入力野から構成される入力層から成る2層神経回路網モデルを用いて、視覚刺激の方位と位置情報の自己組織化について考察する。ここで、入力野とは特定の入力パターンが提示される有限の大きさの領域のことである。出力層は位置情報を反映出来るように、有限の大きさの複数の領域から構成され、この領域をコラムと呼ぶ。一つのコラムは複数のニューロンから成り、簡単のためニューロンは一次元的に配置されている。生理学的知見をもとに異なるコラム間には抑制性の側方結合が存在する。コラム内の側方結合は、通常メキシカンハット型のものとする。このような、コラム内とコラム間で異なる側方結合を、モデルの構成の基本とする。

以上のような構成の神経回路網が所期の機能を有するかどうかについて、数値実験により明らかにした。得られた結果は、ある位置の入力は対応する一つのコラムが反応し、入力的位置が変化すると反応するコラムも連続的に変化する。また、ある位置の入力の方位が連続的に変化すると、対応するコラム内のニューロンが連続的に変化するものであった。つまり、方位情報と位置情報を同時に学習することにより、両者を分離して抽出することができた。コラム間の抑制性の側方結合をゼロにすると、異なるコラムも反応するようになり、位置に対する反応の最適性が低下した。この結果より、位置情報を方位情報と同時に学習するためには、コラム間の側方結合が重要であることが明らかになった。更に、学習に用いていないような入力に対しても要求される出力が得られ、モデルの妥当性が確認された。

### 第4章 統計力学的手法

本章では、本モデルの系をイジングスピン系に対応付けることにより、方位選択性の自己組織化に重要なメカニズムと形成される構造を、理論的に明らかにした。更に、より一般的な状況での数値実験を可能とするための新しい計算手法であるセルフコンシステント-モンテカルロ法を提案している。

平衡状態の出力方程式は非線形連立方程式であり、非常に多くの未知定数や出力層の素子数だけの未知変数を含んでいる。しかし、未知定数や未知変数の初期値をどのように選べば良いかを決定するための一般的な基準が存在しない。このことが解を求めることを困難なものにし、コラム内の構造を2次元にするより現実的な状況での研究が困難となっている。この困難を回避するために、出力を $[0, 1]$ の間の実数から $[-1, 1]$ の間の実数に変数変換し、新しい変数を用いて平衡状態の出力方程式を書き直した。その結果、平衡状態の出力方程式が統計力学における磁化の平均場方程式と対応し、出力と対応する新しい変数がイジングスピンの熱平均量である磁化と対応することが明らかとなった。つまり、本モデルの系が、出力層のニューロンの位置を表わす2次元空間と入力パターンを表わす一次元空間を合せた、3次元格子空間内のイジングスピン系と対応することが明らかになった。この平均場方程式は、自分自身のスピンの熱平均量に比例する一種の平均場の項を含んでいる。このような項は通常物理系には存在せず自己場と名付けた。この自己場はモデルの生物学的特徴を表わす重要な項である。

次に、この平均場方程式をもとに、本モデルに対する擬ハミルトニアン形式を導出した。自己場の項が存在するため、擬ハミルトニアンが自己組織化を実現するという生物学的な意味を持つためには、自己無撞着性の条件を満足する必要がある。このことは、擬ハミルトニアンが通常のエネルギ関数とは異なる関数であることを意味している。この擬ハミルトニアンに基づいて方位選択性について考察することにより、抑制性のニューロンプールの存在が方位選択性の自

己組織化に重要であることが明らかとなった。

最後に、擬ハミルトニアン形式をもとに平衡状態の出力値を計算する有力な手法として、セルフコンシステント-モンテカルロ法を提案している。この手法は通常のモンテカルロ法を改良し、自己無撞着性の条件を満足するようにイジングスピンの熱平均を計算する方法である。直接平衡状態の出力方程式が解けるような場合について、平衡状態の出力方程式を繰り返し法によって求めた解とセルフコンシステント-モンテカルロ法が定性的に同じ結果を与えることを確かめた。

## 第5章 方位選択性皮質地図

本章では、出力層を2次元に広げより一般的な状況での方位選択性について、セルフコンシステント-モンテカルロ法を用いて数値実験を行った。

入力層は唯一つの入力野から構成され、出力層は2次的にニューロンが配置されているような、2層神経回路網モデルを用いた。数値実験によって得られた結果は、初期温度によって3種類の異なる方位選択性皮質地図が得られた。これは、初期温度の違いによって計算される自己場が異なるために生じ、自己場の違いが異なる平衡状態を与えることが分かった。

得られた結果が示す方位選択性皮質地図は、ある点の周りに反応する方位が $180^\circ$ 連続的に変化するような特異点を含むものと、ある方向に方位が $180^\circ$ 連続的に変化するようなものであった。これらの結果から、特異点には次の2つのタイプが存在することが明らかになった。(1)特異点の周りに方位が時計回りに $180^\circ$ 連続的に変化する $+1/2$ 特異点。(2)特異点の周りに方位が反時計回りに $180^\circ$ 連続的に変化する $-1/2$ 特異点。

得られた結果に共通するものは、方位が急激に変化する裂け目が存在することと、周期構造となっていることである。このような周期構造は実際の生理学的実験結果には存在せず、むしろ周期構造の乱れが見られる。本論文の結果が周期構造を示した理由は、側方結合と入力パターン相関の一樣等方に起因すると考えられる。実際、生物の側方結合が完全に一樣等方であるとは考えにくい。また、外界の視覚刺激には異なる位置の入力パターンも存在し、各ニューロンの受容野の大きさの違いや、また眼優位性コラムの影響も考慮する必要がある。このような状況を考慮すると、入力パターン相関も一樣等方とは言えない。そこで、側方結合を非一樣・非等方として同じ初期条件のもとで同様の数値実験を行った。得られた結果は、周期構造に乱れが生じ、 $+1/2$ と $-1/2$ 特異点の両方が存在する、より現実の状況に類似するものであった。このことは、実際の生物の側方結合が完全に一樣等方ではないことを示す結果である。

以上得られた結果は生理学的実験によって明らかにされている方位選択性皮質地図のいくつかの特徴を再現しており、本論文のモデルが方位選択性を形成する上で重要なメカニズムの一つを与えていることを示している。更に、出力層のサイズを小さくした数値実験により、このような特異点が幾何学的な境界の影響によって形成されると考えられることを示している。生理学的実験結果のより詳細な特徴まで再現するためには、側方結合や入力パターン相関の非一樣・非等方性をも考慮したモデルを用いる必要があるものと考えている。しかし、これまで具体的視覚刺激と形式ニューロンを基礎とした構成的モデルによってこのような複雑な皮質構造を実現した研究は存在せず、本モデルによって初めて方位選択性の形成のメカニズムが明らかになった。

## 第6章 結 論

本章では本論文を総括し、研究の成果を述べた。

## 審査結果の要旨

計算機に人間の知的活動に類似の柔軟性と学習能力をもたせようとする試みの一環として、視覚情報処理の原理の解明を目的とした研究がなされている。脳の一次視覚野に方位選択性のあるニューロンが自己組織化され、それがある周期性をもったコラム構造をなしていることが生理学的実験により明らかにされている。しかし、それがいかなる神経回路網で実現されているのか、自己組織化の本質的機序は何かなど、工学的応用を考えた構成的モデルは確立されていない。著者は、方位選択性の形成に外部刺激が重要な役割を果たしていることに着目し、その機能を実現する形式ニューロンに基づく神経回路網を構成し、その性能を解明した。本論文はその成果をとりまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、一次視覚野の神経回路網モデルを与え、外部刺激入力パターンによる学習方法を定式化し、学習終了時点で到達する平衡状態でのニューロン出力が入力パターンの空間相関を反映していることを導いている。

第3章では、位置と方位を有する棒状パターンを提示したとき、その位置と方位を同時に学習する神経回路網モデルを提案し、その機能を数値実験により検証している。モデルは、入力素子から出力素子への結合に可塑性をもたせ、出力素子間には固定的な側抑制結合を与えたもので、学習により特定の位置と方位に反応する出力素子がコラム構造を形成することを実証している。方位と位置を同時に学習するモデルは初めてのものであり、興味深い成果である。

第4章では、神経回路網モデルの平衡状態を決める非線形連立方程式が統計物理におけるイジングスピン系の平均場方程式に類似していることに着目して未知定数である自己場が含まれる擬ハミルトニアン形式を導出し、それに基づいて平衡状態を求める計算手法である自己無撞着モンテカルロ法を与えている。擬ハミルトニアン形式により、神経回路網の学習の機序がスピンの相互作用として理解できること、自己場の存在が平衡状態の多様性を生むこと、抑制性ニューロンプールが方位選択性の形成に重要な役割を果たしていることなどを明らかにしている。これらは重要な知見である。

第5章では、生理学実験により知られている複雑な、しかし、ある周期性をもった配置となる方位選択性ニューロンの皮質構造が出力ニューロンを2次元に配置したモデルで実際に実現されていることを、4章で提案した手法を用いて明らかにしている。いろいろなスピンの初期配置のもとで15個の方位パターンを学習させた場合に到達する平衡状態が、生理学的知見とほぼ同じになることを示し、提案モデルの妥当性と計算手法の有効性を明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、方位選択性の自己組織化過程を形式ニューロンモデルに基づいて構成し、学習のメカニズムとして入力パターンの空間相関と抑制性シナプス結合の存在が重要であることを明らかにするとともに、生理学実験が示す機能を構成的モデルに基づいて解明したもので、情報通信工学および神経回路網工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。