

(続紙 1)

|   |                    |    |        |
|---|--------------------|----|--------|
| 京都大学  | 博士 (情報学)           | 氏名 | 太田 絵一郎 |
| 論文題目  | 脳・神経系のリズムに関わる数理的研究 |    |        |
| <b>(論文内容の要旨)</b> <p>本論文は、脳・神経系のリズムおよび情報表現に関して、位相縮約という自由度を低減する弱非線形解析の手法を基礎に、位相応答関数を計測データから求める新たな実験手法、および連続的な値を保持可能なワーキングメモリの理論モデルに関する2つの研究結果を主として示したものである。</p> <p>第1章では、脳・神経系の基本的事項と関連する実験的知見の解説がされており、その後本論文の概要が述べてある。</p> <p>第2章では、初期視覚野などに見られるカラム構造を説明する理論である自己組織化マップに関する研究成果が述べられている。初期視覚野では脳の高次機能に関連のあるリズムミクな神経活動が最初に報告された歴史的経緯があるが、それも含め脳・神経系の基本的知見を説明する導入も本章は兼ねている。リズムが時間的な情報表現ならば、自己組織化マップは空間的に情報を表現し、高次機能でその情報を活用するための前処理として重要な役割がある。本論文では、シナプス可塑性にある種の空間的非対称性を導入することで、学習能力が向上することを示している。</p> <p>第3章では、脳・神経系のリズムを取り扱う基本的な理論的手法である位相記述について説明されている。適切な条件下では、脳・神経系は周期的振動を示す要素が相互作用する結合力学系と見なすことができ、結合位相振動子で記述出来ることが具体的な応用例と共に説明されている。</p> <p>第4章では、位相縮約した力学系を特徴づける位相応答関数を、実験データから求めるための新しい手法を提案している。周期的に発火する神経細胞の位相応答関数を実験的に求めることができれば、細胞のイオンチャネルの性質等の詳細な特性を知らなくても位相記述の方程式の形を得ることができ、複数の細胞を弱結合した神経回路の同期特性の解析が可能となる。従来の標準的な測定手法では、実験系の背景雑音に伴う誤差等により位相応答関数を正しく推定することが困難になる問題があった。本論文では、連続的な揺らぎ刺激を測定対象に加えた時、その応答に基づいた刺激波形の重み付け平均が位相応答関数に一致するという理論的關係式を導出し、その關係式に基づいた新たな実験測定手法を提案している。更に、数値計算および電子回路を用いた実験により、背景雑音の存在下でも位相応答関数が測定データから正しく求まることを実証し、誤差が生じる要因と対策についても詳細に検討している。</p> <p>第5章では、周期的活動を示す神経細胞が3体相互作用する神経ネットワークが、複数の線状アトラクタ群をもち、アナログ情報 (連続量) のワーキングメモリーとして機能し得ることを示している。神経細胞はシナプス結合を介して相互作用しており、シナプス前細胞が発火することでシナプス後細胞へ入力電流を誘起する2体相互作用が基本的である。しかし、空間的に複雑な樹状突起の構造や神経修飾物質の影響などを考慮すると、後細胞への入力電流が前細胞の状態だけでなく、他の神経細胞の活動状態に同時に依存する、多体間の相互作用が行われている場合も多い。しかし、従来の大多数の神経回路モデルでは、2体相互作用しか考慮していない。本論文では、多体間の相互作用を含む複雑な神経回路の機能を理解する第一歩として、周期的活動を示す神経細胞が3体相互作用するモデルを構成し、その振る舞いを詳細に調べている。結果として、特定の発火活動パターンに対する同期度がある範囲で連続的に変化する状態が全てアトラクタとなっている、いわゆる線状アトラクタと呼ばれる構造が生じることを示している。この結果から、連続値を記憶可能なワーキングメモリーが、従来のモデルのような発火率符号化ではなく、時間的符号化の枠組みでも実現</p> |                    |    |        |

できると述べている。更に、複数の位相パターンを記憶させた場合、それぞれのパターンに対応する線状アトラクタが存在することも示している。この特徴は、単一の神経回路で複数の連続値を同時に記憶可能であることを意味し、従来のワーキングメモリーのモデルには見られない優れた点であると述べている。

第6章では、研究全体をまとめてあり、得られた結果の非線形物理および神経科学としての意義と重要性が述べられている。

(続紙 2)

### (論文審査の結果の要旨)

本論文は、脳・神経系のリズムおよび情報表現に関して、位相縮約という自由度を低減する弱非線形解析の手法を基礎に、揺らぎと応答の理論的關係式に基づき位相応答関数を実験データから求める手法、および連続的な値を保持可能な位相同期を用いたワーキングメモリーの理論モデルに関する2つの研究結果を示したものである。また、神経系の基礎的知見の導入も兼ねて、自己組織化マップの学習を促進させる手法に関する研究成果も示している。

神経ネットワークのリズム現象を解析する際、位相縮約を適用することで各神経細胞の状態を位相という1変数の自由度で表現することが可能となる。そこでは、位相応答関数に元のダイナミクスの性質が反映され、この関数の性質により系の同期特性が決まる。詳細なモデル方程式から縮約して位相記述を得る手法は、流体や燃焼などの物理系から概日リズムなどの生命系まで幅広く応用されてきた。しかし、神経細胞の正確なモデル方程式の構築は、未知のイオンチャネル等の存在もあり、しばしば困難を伴う。そこで、最近では位相応答関数を実験データから直接推定し、縮約した力学系を同定する試みが盛んに行われるようになってきている。一方で、従来の測定手法では、実験系の背景雑音による誤差や、測定の際に様々な位相において刺激を加える制御の難しさ等の問題があった。第1の研究では、これらの問題を回避し得る新たな測定手法を考案し、数値実験および電子回路による実験でこの手法の有効性を確認している。また、本論文で導出されたリミットサイクル振動子系における入力揺らぎと応答の理論的關係式は、この手法の基礎であると同時に、線形応答理論との類似性から非平衡統計物理としても興味深い結果である。提案された手法は高い汎用性を持ち、現実のリズム現象を解析するための実験手法として、神経系だけに限定されない幅広い応用が期待できる。

第2の研究では、神経細胞間の3体相互作用の効果を含めることで得られた神経系のリズムが担いうる機能についての研究結果が示されている。神経細胞間の相互作用は、神経修飾物質の影響や複雑な樹状突起の特性により、2体相互作用のみでは自然に記述することが出来ない例が報告されている。本論文では、周期的活動を示す神経細胞のネットワークに状況を限定し、位相記述を用いて3体相互作用の効果を詳細に調べている。結論として、適切な条件を満たす3体相互作用のある神経回路モデルでは、特定の発火活動パターンに対する同期度にアナログ情報を符号化することで、複数のアナログ情報(角度、振動数等)を記憶することが可能になることを示している。現実には神経細胞間のどのような相互作用がこのメカニズムを可能にするかについては更に検討を要するが、今まで多体相互作用の効果を明示的に示した研究例は少なく、3体相互作用が記憶メカニズムに果たす具体的役割を示したことの理論的な価値は高いと認められる。また、複数の神経細胞における発火パターンの同時計測が近年盛んに行われており、上記結果はそれらの実験データを解釈する上で新たな視点を与えるという実験的観点からの価値も認められる。

以上の理由により、本論文は、博士(情報学)の学位論文として、価値あるものと認められる。また、平成24年2月22日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認められた。