

審査の結果の要旨

氏名 ルル ティモシー ギョム

近年、シーケンシャル記憶は、計算論的神経科学、神経生理学の両面から非常に重要な研究テーマとなってきた。計測技術の進歩により様々な時間的・空間的スケールで豊富な神経活動データが得られるようになってきているが、シーケンシャル情報の認識および生成に関する機構にはいまだ不明な点が多い。これは神経ネットワークの動力学特性と脳内の情報符号化の関係が解明されていないことに起因する。本論文は、神経ネットワークモデルの計算機シミュレーションおよび理論解析により、神経活動における時間的パターンの生成、伝達、保持の機構の解明に取り組んだものである。特に神経生理学的によく知られているロバスト性と柔軟性を持つ時間的パターンの生成に必要な動力学の性質上の条件を明らかにした。また神経生理実験における神経活動パターンの記録の非再現性が、実験技術の面だけではなく理論研究から示唆される神経ネットワークの動力学構造にも起因し得る可能性を示した。本論文は、神経ネットワークの動力学特性およびシーケンシャル記憶の符号化に関して新しい知見を与え、今後の神経生理実験データの解析や実験計画に対して大きな影響を与えることが期待される。

本論文は、「**Neurodynamics of Sequential Memory**」(シーケンシャル記憶の神経動力学)と題し、5章より成る。

第1章「**Background**」(背景)では、神経ネットワークの動力学とシーケンシャル記憶に関して、先行研究を紹介し、本研究の位置づけを明確にしている。

第2章「**Chaotic attractors and learning**」(カオスアトラクタと学習)では、シーケンシャル情報を符号化するカオスアトラクタが、どのように現実的な学習機構により獲得されるかを研究している。アナログ神経ネットワークモデルに対応する平均場モデルを導出し、分岐解析の手法を用いてカオスアトラクタの新しい発生機構を調べることで、継続的な活動状態に対応するアトラクタが周期倍分岐、接線分岐などを介して生成されることを明らかにした。さらに長期的シナプス増強・抑圧の効果をモデルに取り込み、外部入力とシナプス可塑性により神経ネットワークにアトラクタが形成されることを示した。特に、実

際の神経ネットワークに存在するようなシナプス可塑性により、カオスアトラクタが形成されることを示したことが新しい成果である。

第3章「**Deterministic irregularity**」(決定論的不規則性)では、神経生理実験における神経活動の記録において、試行間の神経応答の分散や不規則性が、フラクタルベイスン境界を持つ力学構造に起因し得ることを提案している。この研究では共存する複数のアトラクタにおいてリアプノフ指数を用いてその複雑性を評価することで、決定論的ダイナミクスが実験的に観測される不規則性を説明できることを示している。カオスアトラクタの初期値鋭敏性だけではなく、ベイスン構造のフラクタル性が微少な初期状態の変化を拡大させる終状態鋭敏性により、神経生理実験における非再現性を生じ得る可能性を示した。さらにシナプス伝達効率の変化をモデル化し、ドーパミンやアセチルコリンなどの神経伝達物質により終状態鋭敏性が変化し、結果として試行間の分散が変化することを示した。この研究では、終状態鋭敏性が脳内の新しい計算原理の基盤になる可能性を示しており、その計算論的意義は大きい。

第4章「**Population spike coding**」(集団スパイク符号)では、より現実に近い生理学パラメータに基づく神経モデルを基に大規模神経ネットワークを構築し、カオス動力学とシーケンシャル情報の符号化に関して研究を行っている。リーク付き積分発火型神経モデルをベースに、神経活動のゆらぎ・乱雑さを表すノイズ、様々な時間スケールのシナプス、動的シナプス等の性質を考慮して、多数の興奮性および抑制性の神経細胞からなるネットワークモデルを構築した。このモデルは、皮質上で観測されるアップ・ダウン状態の間の状態遷移を再現する。この状態遷移にともない生じる遅い振動は、シーケンシャル情報の符号化に寄与すると考えられる集団スパイクを発生させる。さらに提案モデルに対応する平均場モデルを導出し、遅い変数・速い変数の違いに着目した安定性解析により、アップ・ダウンの状態遷移の発生機構を詳しく解析している。この研究の結果は神経生理学に大きな示唆を与えるだけでなく、提案している解析手法は他の様々な動力学システムに対しても応用できる可能性がある。

第5章「**Summary**」(要約)では、本論文の結論をまとめるとともに、今後の発展の可能性について議論している。

以上を要するに、本論文はシーケンシャル記憶の理論的研究に関して新規性の高い神経ネットワークモデルを提案し、神経生理実験結果を説明するとともに、その動力学特性を詳しく解明した。この成果は、計算論的神経科学および電気系工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。