

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 徐 牧 原

ネットワークレベルで脳内の情報処理を理解することを目指すシステム神経科学は、実験的研究と理論的研究を駆逐することによって大きく発展してきている。しかしながら、複数の情報処理要素の相互作用から生み出される非線形ダイナミクスが、どのようにして脳の特徴である柔軟な情報処理を実現するかという問題は、まだほとんど明らかになっていない。本論文では、連想記憶、リザーブコンピューティング、およびサルの前頭前皮質における論理計算を具体的な対象として、ニューラルネットワークにおける情報処理の背後にある非線形メカニズムの解明に向けて研究を行ったものである。

本論文は「Flexible Information Processing with Nonlinear Dynamics in Neural Networks」（ニューラルネットワークにおける非線形ダイナミクスを用いた柔軟的な情報処理）と題し、5章からなる。

第1章「Introduction」（序論）では、ニューラルネットワークにおける非線形ダイナミクスを数理的アプローチによって研究するために、ニューロンの振る舞いを表現する数理モデルについて概説している。また、従来の研究によって確立された2つの重要なフレームワーク、すなわち、アトラクターネットワークとリザーブコンピューティングを説明し、情報处理的な側面からまだ明らかにされていない点について述べている。

第2章「Stability of Associative Memory with Short-Term Synaptic Dynamics」（短期シナプス動力学を持つ連想記憶の安定性解析）では、脳に広く存在する短期シナプス可塑性を取り込むことによって従来のスパース符号化された連想記憶モデルを拡張した。提案モデルにおいて、シナプスにおける動的変化を考えることによって、より現実的かつ豊富な非線形ダイナミクスの存在を明らかにした。また、平均場近似を用いることにより、ネットワークにおける確率的なダイナミクスを決定論的な低次元力学系によって記述できることを示している。この低次元力学系のダイナミクスを分岐解析することで、元のネットワークにおける巨視的なダイナミクスと連想記憶の安定性を明らかにした。さらに、数値計算によって位相空間におけるダイナミクスの各パラメータに対する依存性を調べている。その結果、短期シナプス可塑性の異なる性質によって、ネットワークが様々な非線形ダイナミクスを見せることがわかった。特に、連想記憶がスパース符号化された場合、記憶想起のパフォーマンスは低下するが、抑制性ニューロンからのフィードバックを加えることによってパフォーマンスが回復できることが明らかになった。一方、複数の記憶パターンを遷移する振動ダイナミクスが発生する場合、スパース符号化によって振動に関わる記憶パターンの数が増えることが示された。これらの結果は、脳内の情報処理が短期シナプス可塑性により影響され得ることを示唆している。

第3章「External Input-Forced Onset of Chaos in Random Neural Networks」（ランダムニューラルネットワークにおける外部入力により発生するカオス）では、リザーブコンピューティングのフレームワークにおいて、外部入力の統計的性質の変化によって引き起こされるリザーブを構成するランダム

ニューラルネットワーク内の非線形ダイナミクスの変化を解析した。平均場近似と数値計算によって、外部入力の平均や分散が小さい時は、リザーバーの状態は固定点に収束し、外部入力の平均あるいは分散が十分大きい時は、カオスが発生することを示した。さらに、リザーバーコンピューティングのパフォーマンスを最大化すると考えられるパラメータ領域を特定した。これらの結果は、外部入力によるリザーバーの非線形ダイナミクスの変化を明らかにしたものであり、リザーバーの設計に応用できると考えられる。

第4章「Logical Computation in Monkey's Prefrontal Cortex」（サルの前頭前皮質における論理計算）では、サルの前頭前皮質から記録した電気生理データを解析し、論理計算を実行していると考えられている前頭前皮質ネットワークの数理モデルを構築している。ここでは、異なる文脈によって、情報を柔軟に統合するメカニズムに焦点を当てている。従来の研究ではトライアルごとに文脈が明示されていたが、本研究の条件では、それを明示しないことによって、文脈の内部表現の生成を強いている。まず、電気生理実験データから文脈を含む様々な情報の時間的変化をデコードする上で必要になると考えられる情報表現の動的変換を示した。この結果を踏まえて、前頭前皮質には複数の細胞集団が存在し、様々な情報を柔軟に処理するために、情報を統合しているという仮説を主張している。この仮説に基づいてリカレント構造とフィードフォワード構造を有しているネットワークモデルを提案した。さらに、数値シミュレーションによって、提案モデルが実験データ内に含まれている情報の時間的変化を定性的に再現できることを示している。これらの結果は、前頭前皮質における多様な細胞集団とリカレント構造・フィードフォワード構造が論理計算に大きく貢献している可能性を示している。

最後に第5章「Conclusion」（結論）では、本論文の成果を簡潔に纏めると共に、今後の研究課題を提示している。

以上を要するに、本論文はネットワークにおける非線形ダイナミクスに着目し、脳の柔軟な情報処理の背後にあるメカニズムの解明に向けて、新たな数理モデルを提案した。その結果、短期シナプス動力学、ランダムニューラルネットワークへの入力、さらにはリカレント構造やフィードフォワード構造などの多様な要因のニューラルネットワーク情報処理に対する影響を明らかにした。これは数理情報学および神経科学の研究に貢献するところが多い。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。