

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 奥 牧人

近年、脳神経科学の分野において、マイクロとマクロの中間に位置するメゾスケールを対象とした研究が重要性を増してきている。その理由の一つとして、従来は技術的に困難であった大規模数値計算や多細胞同時計測などの技術が発展してきたことが挙げられる。また、従来の研究では比較的小規模な神経回路網を扱うことが多く、より大きなスケールの現象、例えば、進行波や神経細胞の集団と集団の相互作用などのメカニズムは、まだ十分に明らかになっていない。本論文は、このようなメゾスケールレベルでの脳現象に対し、数値計算や数理モデリング等のアプローチを通して、その解明を目指すものである。

本論文は「Mathematical Modeling of Meso-Scale Nonlinear Dynamics in the Brain」（脳におけるメゾスケール非線形ダイナミクスの数理モデル化）と題し、8章からなる。

第1章「Introduction」（序論）では、脳神経科学の歴史と現状を概説した上で、今後のさらなる発展のためには、マイクロ、メゾ、マクロの異なるスケールを通じた階層的な理解が必要であることを指摘している。また、本論文で着目するメゾスケールレベルの近年の研究動向をまとめ、その重要性、アプローチ法について説明している。

第2章「Parallel simulation of large-scale CNNs」（大規模CNNの並列計算法）では、大規模なカオスニューラルネットワーク（以降、Chaotic Neural Networkを略し、CNNと表記する）を数値的に扱うための技法について述べている。具体的に、素子数が100万以上のネットワークを扱う際の工夫として、分散メモリ型の並列計算とスパースなネットワーク結合を用いている。ネットワーク結合の空間構造の違いにより、記憶パターン間のカオスの遍歴や進行波などが見られるという結果が示されている。

第3章「Visualization of CNNs by using color images」（カラー画像を用いたCNNの可視化）では、カラー画像をCNNに記憶させることで、CNNのダイナミクスを可視化する手法について述べている。色の表現法に関して複数の符号化法が考えられるが、各符号化法によるカオスダイナミクスの見え方を比較し、その違いについて考察している。

第4章「Phenomenological model of traveling waves in CNNs」（CNNにおける進行波の現象論モデル）では、CNNを粗視化した数理モデルを提案している。ポッツモデルを基にしたこのモデルは、各スピンの不応性を有しており、元のモデルと同様な複雑な進行波を発生させることが出来る。

第5章「Memory relations in CNNs」（CNNにおける記憶関係性）では、記憶間関係性ネットワーク構造を持つCNNのダイナミクスについて調べている。この数理モデルは、従来の自己連想的な結合に加え、記憶から記憶への相互連想を表すための結合を有している。一つの記憶からの行き先が複数ある場合に、遷移先がカオスダイナミクスによって不規則に選ばれるという結果が示されている。

第6章「Computation of the Rule 110 in modular neural networks」（モジュール構造を持つ神経回路網におけるルール110の計算）では、モジュール構造を持つ神経回路網について調べている。各モジュールはそれ自体が連想記憶ネットワークとなっており、それらが近傍モジュールと相互作用する。数

値計算により、このモデルが1次元セルラーオートマトンのルール110のような複雑な遷移則を表現可能であること、また、その計算の際にある程度のノイズ耐性を有することが示されている。

第7章「Meso-scope model of dynamical inter-region coupling」（動的な領域間結合のメゾスコピックモデル）では、脳の異なる領域と領域が動的に機能的な結合を形成する様子を記述する数理モデルを提案している。このモデルは、「動的な領域間結合は、より大きな空間スケールで見た際のアトラクタに対応しているのではないか」という仮説に立脚しており、力学系理論の観点から動的な領域間結合の説明を試みるものである。

第8章「Conclusions」（結論）では、以上の結果に対するまとめと考察を述べている。

以上を要するに、本論文は大規模神経回路網や粗視化モデルなどの数理モデルとシミュレーションに基づいて、進行波やモジュール間相互作用など、脳におけるメゾスケールレベルの現象を多角的に調べ、新たな知見を得ている。これは数理情報学および理論神経科学に貢献するところが大きい。

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。