

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 佐瀬 巧

近年の神経科学分野の研究は、理論的研究と実験的研究の双方が相互作用することにより、著しい発展を見せている。特に、理論と実験との橋渡しをし得る学問の体系として機能する数理工学の重要性が、高く認識されつつある。例えば、実世界に満ち溢れている非線形性を研究する道具である非線形時系列解析や数理モデリングなどを神経科学分野へ取り入れることにより、脳の巨視的な振動現象が示す非線形ダイナミクスの特徴が少しずつ明らかにされている。しかしながら、そのような非線形ダイナミクスを効果的に解析する手法およびその非線形ダイナミクスを説明するのに有効な数理モデルはまだ十分に整備されていない。本論文は、脳の巨視的な振動現象に内在する非線形ダイナミクスの解明に向けて、数理工学の視点から新しい道具立てを提案することを目的としたものである。

本論文は「Analyses on Nonlinear Dynamics with Multiple Time-Scales in the Brain (脳における多重時間スケールを有する非線形ダイナミクスの解析)」と題し、4章からなる。

第1章「Introduction (序論)」では、脳の巨視的な振動現象の解明に向けた研究アプローチの歴史的背景を述べている。まずは従来の線形時系列解析について述べ、その解析の問題点を明確にし、非線形時系列解析の必要性を議論している。さらには、現在の非線形時系列解析の問題点を述べ、系の軌道の特徴づけているノイズ(ダイナミカルノイズ)を効果的に解析する手法の開発が重要であることを主張している。次に、脳の巨視的な振動現象に関する数理モデルについて述べ、それらモデルの問題点を明確にしたうえで、微視的なニューロンモデルから巨視的なモデルへと導く平均場近似の必要性を説いている。そして、脳の振動現象が示す線形性の側面(パワースペクトラムの主要ピークに対応する多重時間スケール)を取り入れつつ非線形ダイナミクスを研究するアプローチの有効性を述べている。

第2章「Analysis on signals composed of deterministic and stochastic oscillations (決定論的および確率論的振動で構成される信号の解析)」では、確率微分方程式系に含まれる決定論的成分と確率論的成分を効果的に解析する新規の非線形時系列解析手法を提案している。この手法は、ダイナミカルノイズのレベルを観測された時系列のみから推定することを目的としており、時系列の背後に潜む非線形ダイナミクス自体の情報は必要としない。従来のHiguchiのフラクタル次元の定義から、Time Series Dimension (TSD)という新しい次元を導き、TSDがダイナミカルノイズレベルの単調増加関数になることを示している。4種の標準的な数理モデルを利用して提案手法の性能を評価しており、従来手法よりも精度良く推定できることを実証している。さらに、時系列が短いときには、TSDは系に依存しない普遍的な量になることを示唆している。この短さの定義を連続信号の弱定常性の定義から導くことにより、TSDの適用可能性を議論している。そして、提案手法を脳の巨視的な振動現象が反映された脳波データへと応用し、視覚入力に起因して脳の前頭部のノイズレベルが上昇する可能性を示している。

第3章「Analysis on signals composed of deterministic slow and fast oscillations (決定論的低速および高速

振動で構成される信号の解析) 」では、従来の確率的離散時間興奮ニューロン群のモデルに、抑制性ニューロン群とシナプス後電流に相当する変数を新たに付加し、実際の脳の神経ネットワークにより近い数理モデルを提案している。平均場近似を施すことにより、確率モデルを低次元離散時間力学系へと変換し、各変数を脳の巨視的な振動現象に対応づけている。この数理モデルを分岐解析することにより、興奮性および抑制性ネットワークの各々で低速振動および高速振動が不変閉曲線上を回る準周期振動として現れることを明らかにしている。さらに、それらネットワーク間を相互作用させ、高速振動の振幅が低速振動の位相によって変調される周波数間カップリングが出現することを示し、2種のカップリングモードに分類している。1つは2次元トーラス上を回る準周期振動、もう1つは不変閉曲線上を回る準周期振動である。これら2種のアトラクター間の分岐は、安定な不変閉曲線とサドル型の不変閉曲線が衝突・消滅することによって生じるものであることを数値解析で示している。このような分岐で隔たる2種のカップリングモードは、外界から入力される情報に応じて機能的に切り替えられると予想される。

最後に第4章「Conclusions (結論)」では、本論文の成果を簡潔にまとめると共に、今後の研究課題を提示している。

以上を要するに、本論文は脳の巨視的な振動現象に内在する非線形ダイナミクスの解明に向けて、数理工学の視点から新規の非線形時系列解析手法および数理モデルを提案したものである。その結果、脳波などの時系列データから、その背後にある非線形ダイナミクスを特徴づけるダイナミカルノイズのレベルを推定できるようになった。さらには、周波数間カップリングの生成機構を数理モデルにより説明し、2種のカップリングモードが環境の変化に応じて切り替わる可能性を示した。これらの成果は、数理情報学および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。