

氏 名	こおり 郡 宏
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2577 号
学位授与の日付	平 成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Slow Switching in Globally Coupled Oscillators (大域結合振動子系における遅い転移現象)

論文調査委員	(主 査) 教 授 蔵 本 由 紀	教 授 吉 川 研 一	助教授 篠 本 滋
--------	----------------------	-------------	-----------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、スロースイッチングと呼ばれる、大域結合をもつリミットサイクル振動子の大集団において見られる特異な集団運動に関する理論的研究である。

申請者は、まずこの現象が神経細胞の動的モデルとして代表的な leaky integrate-and-fire モデル (LIF) の大域結合集団で可能であることを示した。そのため、振動子間の弱結合を仮定し、個別振動子が自励振動を示すという条件の下で、この集団モデルの位相縮約を実行し、解析の容易な位相振動子モデルの標準形に変形した。しかる後、集団の完全同期状態 (1 クラスター状態)、および集団が2つの位相同期クラスターに分裂して定常振動を行う状態 (2 クラスター状態) の線形安定性解析を行った。その結果、このモデルから得られる位相結合関数の性質は、1 クラスター状態のみならず2 クラスター状態をも不安定にし、その結果、広い条件下でスロースイッチング現象が見られることが明らかとなった。申請者が明らかにしたスロースイッチング現象の発生機構は次のように述べられる。2 クラスター状態は、位相空間を定常回転する2つの点クラスターとして描くことができるが、それが不安定化すると、回転運動において先行するクラスターが溶解し、それが他の点クラスターの背後に回って点クラスターに収束する結果、再び2 クラスター状態が出現する。しかし、この状態もまた不安定であることから、同様の崩壊過程が繰り返される。しかし、相次ぐ崩壊過程間の時間間隔 (すなわち過渡的な2 クラスター状態にある時間) は次第に増大し、時間無限大で無限大にのびる。このようなスロースイッチング現象は、2 種類の不安定な2 クラスター状態をつなぐヘテロクリニックループの形成によってもたらされる。ヘテロクリニックループは通常は構造不安定と見なされているが、申請者は、同一の振動子から成る大域結合集団においては、系がもつ固有の対称性によってこの状態が構造安定化することを明らかにした。また、スロースイッチングを引き起こすために位相結合関数が満たすべき性質を明らかにした。

申請者は、この現象が位相振動子モデル固有のものではないことを示すために、神経振動子の2変数モデルとして知られている Hindmarsh-Rose モデルおよび Morris-Lecar モデルを個別振動子として考え、その大域結合集団のモデルに対して数値シミュレーションを行うことにより、その主張を裏付けた。また、結合の様式がギャップジャンクションに対応する拡散的結合であっても、シナプス結合に対応するパルスの結合であっても、スロースイッチングは容易に現れることを確認した。また、これらのモデルに対して弱結合の条件下で位相縮約を実行し、数値的に得られた位相結合関数がスロースイッチングの出現に必要な条件をみたしていることを確認した。

また、LIF を含む上記のさまざまな結合振動子系において、結合に時間遅れが存在すればスロースイッチングはいつそう容易に出現することも明らかとなった。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

リミットサイクル振動子の集団が示す多様なダイナミクスの研究は、非線形現象の科学における最も重要なテーマの一つ

であり、物理、化学、生物、工学、脳科学を含む広範囲の分野と接点をもっている。本論文が取り上げたスロースイッチング現象は、このような集団が示す特異な集団運動として、D. Hansel らが1993年に初めて理論的に見出したものである。Hansel らは第一および第二調和項をもつ仮想的位相結合関数を用いてこの現象を実現した。そして、この現象が2つの鞍点を結ぶヘテロクリニックループの形成によるものであることを主張した。しかし、通常は構造不安定と考えられるヘテロクリニックループがなぜ種々の摂動に対して安定的に持続するかの理論的説明はなかった。また、この現象と現実の系との関わりについての示唆もなかった。申請者は、本論文によってヘテロクリニックループの構造安定性の根拠を明らかにし、相空間の構造から、同一の振動子から成る大域結合集団の枠内では、この現象が摂動に関してロバストであることを明快に論じた。これは申請者の特筆すべき貢献である。それと同時に、2クラスター状態の不安定化がスロースイッチングに導く直感的な説明を提示した点も評価される。それは位相モデルの特殊性に依存しておらず、したがって、個別振動子がベクトルモデルであたえられる場合にも同様の現象が可能であることを説得的に示すものである。

また、この現象を神経振動子集団のモデルとの関係で論じた意義も大きい。神経回路網の便利な力学モデルとして広く用いられているパルス結合 LIF モデルは、そのままでは理論的に扱い難い。申請者は、パルス結合として一般に時間遅れをもつアルファ関数を仮定し、そのような集団モデルに位相縮約法を適用することに始めて成功し、位相結合関数の解析的表式を得た。これによって、弱結合の条件下ではあるが、神経振動子集団の理論解析が格段に容易になった。特に、スロースイッチングに関しては、縮約の結果として得られる位相結合関数の形が、この現象を引き起こすために必要な条件を備えていることを明らかにしたことは高く評価される。また、結合における時間遅れの効果をスロースイッチング現象との関連で論じた点もまったく新しい。

申請者は、LIF モデルのみならず Hindmarsh-Rose モデルや Morris-Lecar モデルの解析を実行することにより、スロースイッチング現象の普遍性に関する強い根拠をあたえている。また、これらのモデルを位相縮約することにより、必然的にこの現象が現れることの根拠を論じている。

全体として、本論文の内容は、理論的な掘り下げが非常に深い独創的な研究であり、数々の新しい結果も導き出されており、この分野の発展に大きく寄与するものである。よって、本論文は、博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これらに関連した分野について諮問した結果、合格と認めた。