

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	はた しげふみ 秦 重 史
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 24 年 3 月 26 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) 共通ノイズ同期に最適なりズム素子の応答特性	
論 文 調 査 委 員	(主査) 篠本 滋 准教授 太田 隆夫 教授 小貫 明 教授

(続紙 1)

京都大学	博士（理学）	氏名	秦 重史
論文題目	共通ノイズ同期に最適なリズム素子の応答特性		
(論文内容の要旨)			
我々の身の回りにはリズム素子、すなわち自律的なリズムを持ったシステムが数多く存在し、複数の素子のリズムが同調する同期現象が様々な場面で見られる。同期現象のひとつとして、共通揺動外力に誘起される、結合を持たない素子集団の同期が挙げられる（共通ノイズ同期）。本論文は、この共通ノイズ同期現象について、特に、素子に加わる外力が強く、素子の応答が外力強度に対して非線形性を持つ場合を扱っている。この枠組みの中で、共通ノイズ同期状態を最も安定化する素子の応答設計を論じ、また、同期を誘起する揺動外力の一般化に向けて、既存の揺動外力の拡張を行ない、同期状態の解析を行なっている。 本論文は全6章で構成されている。このうち、申請者自身の研究結果は第4, 5章にまとめられている。第1章ではリズム現象に関する研究背景、続く第2章ではリズム現象を記述する理論的枠組みである位相縮約法について述べている。リズム素子の外力に対する応答は、位相縮約法によって、位相応答曲線に集約される。これを説明するとともに、位相応答曲線の測定方法を紹介している。第3章では申請者自身の研究テーマである共通ノイズ同期現象に関する先行研究のうち、特に自身の研究に関係が深いものを紹介した上で、問題提起を行なっている。 第4章では、共通ノイズ同期現象を最も安定にする素子の位相応答曲線を理論的に導いている。素子に加わる外力の強度が十分に弱く、素子が外力強度に対して線形に応答する場合については、A. AbouzeidとG. B. Ermentroutによって、正弦関数型の位相応答曲線が同期状態を最も安定化することが理論的に示された。しかし、外力が強く、素子の応答が非線形性を含む場合、最適な位相応答曲線の形は先行研究の結果とは異なることが予想される。これを受けて、非線形応答を記述できるランダムインパルス駆動系を取り上げ、この枠組みの中で系のリアプノフ指数を適切な拘束条件の下で最小化することで、共通ノイズ同期状態を最も安定にする位相応答曲線を理論的に求めている。その結果、外力強度が強くなるにつれて、最適な位相応答曲線の形は正弦関数型からノコギリ歯型に遷移していくことを明らかにしている。また同様に、リアプノフ指数を最大化することで、同期状態を最も不安定にする位相応答曲線も導いている。さらに、同期状態を最も安定あるいは不安定とする位相応答曲線の、拘束条件の強さに対する依存性を考察している。 第5章では、共通ノイズ同期を誘起するランダムインパルス外力を、中尾らが扱ったポアソンインパルスの場合から一般化している。ポアソンインパルスから周期インパルスまでを連続的に記述できるガンマインパルスを提案し、これに誘起される同期状態を解析することで、共通ノイズ同期と位相ロックの違いを論じるとともに、両者間の遷移を調べている。解析手段として位相分布、周波数デチューニング、リアプノフ指数、情報量を用いている。 最後に第6章において、申請者自身の行なった研究の結果をまとめると共に、共通ノイズ同期現象に関する研究の、今後の可能性・方向性を論じている。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

共通ノイズ同期現象は、共通揺動外力に駆動される、相互作用を持たないリズム素子集団の同期現象である。この現象は、素子間の相互作用による同期や、周期外力に誘起される位相ロックによる同期現象と比べて、比較的最近になって発見された。この現象を説明する理論研究としては、寺前・田中による位相振動子を用いた解析がよく知られている。それ以前にもいくつかの理論研究がなされてきたが、彼らの研究により一般の非線形振動子についてその普遍性が示され、これを口火に一層多くの理論研究が行なわれた。現在では様々な種類の揺動外力によって同期が促進されることが示され、また、同期状態を最も安定化する素子の応答特性が示されるなど、多方面から共通ノイズ同期現象の理解が進んでいる。

このような枠組みの中で、申請者は「素子の非線形応答」に着目した研究を行なった。共通ノイズ同期現象に関する理論研究の多くは、数学的な簡便性から、素子に加わる外力の強度が十分に小さく、素子が外力強度に対して線形に応答することを仮定している。しかし、自然界のリズム素子がこの仮定を満たしている保証はない。このため、共通ノイズ同期現象を理解するにあたって、非線形応答を取り入れた理論の一般化は必要不可欠である。

申請者は、非線形応答を記述できる揺動外力の一つであるポアソンインパルスに誘起される同期について、リアプノフ指数を用いて同期状態の安定性を論じた。適切な拘束条件のもとでリアプノフ指数を最小・最大化することで、同期状態を最も安定化、あるいは不安定化する素子の応答特性を求めた。これにより得られた、最適な応答特性の、応答の非線形性に応じた遷移は、非線形応答を考慮することの重要性を示唆するものである。前述の通り、自然界のリズム素子が線形応答を満たす保証はないため、申請者の研究結果はリズム現象を理解する上で、大変重要な結果である。また、先行研究により、線形応答の範囲における最適な応答特性はすでに示されていたが、非線形性を取り入れることで、同期状態をより安定化できることが示された。共通ノイズ同期は、一般に、素子間の相互作用や位相ロックによる同期と比べて安定性が低いため、なるべく安定な同期状態を実現する素子の設計を行なうことは、共通ノイズ同期現象の工学的応用に向けても大変有益であることが期待される。このような観点からも申請者の研究結果は高く評価できるものである。

また申請者は、ポアソンインパルスから周期インパルスまでを連続的に記述できるガンマインパルスモデルを提案し、これに誘起される同期状態を調べることで、共通ノイズ同期と位相ロックの違い、および両者間の遷移を論じた。これまで、共通ノイズ同期と位相ロックの違いに関する議論は定性的なものが中心であったが、申請者は位相分布、周波数デチューニング、リアプノフ指数、情報量などを用いて、両者の違いを定量的に明らかにした。特に相互作用情報量を用いた解析は大変独創的であり、その結果は「位相ロックでは各素子が共通外力に引き込まれた結果として同期が促進される一方で、共通ノイズ同期では各素子は外力に引き込まれることなく同期する」という二つの同期状態の特徴を明瞭に捉えている。

これら申請者の研究結果は、物理学分野において国際的に高い評価を受けている英文雑誌 **Physical Review E** に掲載されているが、調査委員会は本申請論文も詳しく審査し、博士(理学)の学位論文として価値あるものと認めた。

平成23年12月28日に論文内容の発表とそれに関連した口頭試問をおこなった。発表では既存の研究の紹介に始まり、研究の位置づけを明らかにしつつ、問題点を整理して研究成果が報告された。発表は明瞭で説得力があり、申請者は質問に対し的確な返答を行なった。調査委員会は申請者が学位取得にふさわしい力量の持ち主であると判断し、その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降