



Title	周期的変調を受ける確率論的神経モデルの研究
Author(s)	下川, 哲也
Citation	大阪大学, 2001, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3184206
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名	下川哲也
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 16346 号
学位授与年月日	平成13年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 基礎工学研究科システム人間系専攻
学位論文名	周期的変調を受ける確率論的神経モデルの研究
論文審査委員	(主査) 教授 佐藤俊輔
	(副査) 教授 長井英生 教授 潮俊光 講師 野村泰伸

論文内容の要旨

本論文は、周期的な変調を受ける Leaky integrate-and-fire (LIF) 神経モデルの応答に関する研究をまとめたものであり、以下の 8 章から構成される。

第 1 章では本論文の導入として、神経細胞の情報処理と熱搖らぎなどの雑音との関連について述べ、本研究に至った動機、そしてその目的について述べる。

第 2 章では実際の神経細胞の持つ電気的性質をまとめ、本研究で用いる LIF 神経モデルを導出する。

第 3 章では周期入力を受ける決定論的な LIF 神経モデルの応答を解析し、m : n 位相同期、準周期的応答、非カオス的な非周期応答、そして有限時間内に応答が終了する場合の、計 4 通りに分類できることを示す。

第 4 章では確率論的単一 LIF 神経細胞モデルの理論的解析法を提案する。雑音存在下における膜電位が Ornstein-Uhlenbeck (OU) 過程にしたがう。そこで OU 過程の初通過時間分布を用い、スパイク列のパワースペクトルなどの統計量を与える方法論を提示する。

第 5 章では、第 4 章で与えた方法論を用いて、確率論的単一 LIF モデルの入出力応答における雑音の影響に関する確率共振現象を調べる。確率共振現象とは、周期信号に対するモデルの応答がある雑音強度で最大となる現象である。応答の大きさを表す指標として信号雑音比を用い、それを時間領域では発火間隔分布を、周波数領域ではパワースペクトルを用いて定義する。我々は、系の応答を最大にする最適な雑音強度の決定要因を探るために、双安定系で知られていた時間尺度整合条件という仮説を、閾値と単一の安定点を持つ LIF 神経モデルにおいて検証する。

第 6 章ではコヒーレンス共振現象を解析する。周期信号入力がなくても、例えば雑音のみによって、神経モデルは確率的ではあるが発火パルス列を出力する。その発火現象はある周波数成分を特異的に多く持っている。こうした雑音駆動の周波数成分が適切な雑音強度において最大となる現象をコヒーレンス共振と呼ぶ。我々は、第 4 章で紹介した方法論等を用い、時間領域と周波数領域に分けて、コヒーレンス共振現象の発生機構を調べる。

第 7 章では、多数の単一神経細胞モデルより成る集合神経モデルを扱う。個々の単一モデルが出力するスパイク列を重ね合わせ、集合モデルの出力とする。さらに、集合モデルを構成する単一神経モデルの数が十分大きい場合は、出力であるその重ね合わせたスパイク列がポアソン点過程とみなせる性質を利用し、瞬時発火率などの統計量を求める理論的解析法を与える。次に、これらの統計量を用いて、(1)入出力の相互相關関数、(2)信号雑音比、(3)発火タイミング精度を表す指標を定義し、雑音強度依存性を解析する。

第8章では本論文の結果を総括する。

論文審査の結果の要旨

本論文は、周期的な変調を受ける Leaky integrate-and-fire (LIF) 神経モデルの応答に関する研究をまとめたものであり、以下の8章から構成される。

第1、2章では本研究の目的、準備的な事柄、使用する LIF 神経モデルなどについて述べる。LIF 神経モデルは、神経細胞の膜電位に対応する変数 V が、入力に従って閾値に達すると発火（活動電位を発生）し、その後初期値 V_0 にリセットされるというモデルである。

第3章では、周期入力を受ける決定論的な LIF 神経モデルの応答を解析した。まず n 番目の発火時刻を t_n とし、引き続く発火時刻 t_{n-1} と t_n 間の関係 f_n を定義した。つぎに発火時刻 t_n における周期入力の位相を n 番目の発火位相 θ_n とし、 θ_{n-1} と θ_n の関係 f_θ （いわゆる位相遷移曲線）を定義した。そして、この写像 f_θ が1回作用される間に進む平均の位相量として回転指数を定義し、その値が有理数ならば神経モデルの応答は位相同期、無理数ならば準周期的振舞い（ f_θ が逆写像を持たない場合は非カオス的な非周期的振舞い）と分類できることを示した。

第4章では確率論的単一 LIF 神経細胞モデルの理論的解析法を紹介した。まずモデルの膜電位変数 V が初期値 V_0 から出発して、はじめて閾値に到達するまでにかかる時間の分布が、OU (Ornstein-Uhlenbeck) 過程の初通過時間分布で与えられることを示した。そして、この初通過時間分布を用い、前の発火位相が与えられたという条件のもとで次の発火位相の条件付確率密度関数を与えた。さらに、この確率密度関数を核関数にもつ積分方程式を用いて、 $n-1$ 番目の発火位相の分布 h_{n-1} が与えられたときに次の発火位相分布 h_n を与える確率的位相遷移演算子 P を定義した。この演算子の特性を理論的に解析した。本論文では OU 過程の初通過時間分布を用いて、スパイク列のパワースペクトルなどの統計量を与える方法論を提示した。第5章と第6章では、第4章で与えた方法論を用いて、確率論的単一 LIF モデルの入出力応答における雑音の影響に関する現象である、確率共振とコヒーレンス共振現象について調べた。第5章で解析する確率共振現象とは、周期信号に対するモデルの応答がある雑音強度で最大となる現象である。本研究では、最適な雑音強度を決める要因をしらべ、双安定なポテンシャルの系で提唱されていた最適雑音強度に関する時間尺度整合条件という仮説を、閾値と単一の安定点を持つ LIF 神経モデルにおいて検証した。その検証の過程で、時間尺度整合条件で確率共振を説明できるのは入力が小さい場合だけであることを示した。さらに入力が大きい場合の確率共振現象は、平均周波数ロック現象によって説明できることを述べた。第6章で解析するコヒーレンス共振現象とは、いわば周期信号入力がない状況での確率共振である。時間領域と周波数領域に分けて、コヒーレンス共振現象の発生機構を調べた。第7章では、これまで扱ってきた単一神経細胞モデルを多数集めて構成した、（互いに結合を伴わない）集合神経モデルを扱った。第8章では本論文の結果を総括した。

このように、本論文は、周期的な変調を受ける Leaky integrate-and-fire 神経モデルの応答から、確率共振やその他の現象の生じる機構に関する研究をまとめたものであり、理論神経生物学の分野の発展に貢献した。よって、博士（工学）の学位論文として価値があると認める。