

2011年7月6日

博士学位論文審査報告書

大学名 早稲田大学
研究科名 人間科学研究科
申請者氏名 川口 港
学位の種類 博士（人間科学）
論文題目 確率共振現象による海馬ニューロンネットワークモデルでの情報伝送の改善
Improvement of Information Transmission in Hippocampal Neuron Network Models with Stochastic Resonance
論文審査員 主査 早稲田大学准教授 百瀬 桂子 博士（工学）（早稲田大学）
副査 早稲田大学教授 藤本 浩志 博士（工学）（早稲田大学）
副査 早稲田大学元教授 戸川 達男 工学博士（東京大学）
副査 関東学院大学教授 簗 弘幸 博士（工学）（早稲田大学）

本研究は、中枢神経系で観測されるゆらぎが、情報処理機構に積極的に寄与することを示したものである。特に、閾値をもつ非線形系で観測される確率共振現象に着目していることから、本研究は神経細胞で観測される膜電位ゆらぎが神経情報処理の理解に貢献することを示すだけでなく、確率共振現象に対する新たな枠組みを提案している。

確率共振現象とは、閾値をもつ非線形系において、適切な強度の雑音（ゆらぎ）の印加が閾値未満の入力信号の伝送を改善するという現象のことである。1980年代に発見されたこの現象は、さまざまな形で観測と応用がなされている。一般にニューロンは閾値をもつ非線形系であり、感覚神経系においても確率共振現象を示唆する報告がなされ、特に2000年代には中枢神経系（海馬）のニューロンにおける確率共振現象が示唆された。海馬はそもそも癲癇の発生源であると同時に宣言的記憶の座であることが知られており、確率共振は海馬ニューロンにおけるこれらの情報処理機構の理解を促す可能性をもつといえる。

しかしながら、従来研究では確率共振現象によって閾値未満の微弱で周期的な信号の検出がなされることが観測されたものの、ランダムな成分を入力信号としたときの確率共振の効果は不明であった。さらに、海馬においてはその内部における情報伝達の過程で、内部の小領域内および小領域間のニューロン同士の結合加重が変化することで、短期的な記憶形成がなされていると考えられている。このような学習過程が進むにつれて、シナプス結合における入力信号成分が閾値以上になる可能性が考えられるが、そのような閾値以上の入力信号に対する確率共振の効果も不明であった。

そこで本研究では、海馬ニューロンモデルの集合活動において、ランダムに生成された興奮性シナプス刺激（入力信号）の情報伝送が、それに無相関な興奮性シナプス活動（ゆらぎ）によって改善されるか否か、または改善されるならばどのようなようにして改善されるかを、計算機シミュレーションを通して調査することを目的としている。調査は、入力信号成分が、1) 閾値未満である場合、2) 閾値以上である場合、さらに3) 閾値未満の入力信号を受けるニューロンと、閾値以上

の入力信号を受けるニューロンが混在している場合に分けて行われ、それらの結果がまとめられている。

本論文は、まず序として、本研究の背景と経緯をふまえた研究目的と課題の位置づけを述べ、本論文の構成を示している。

第1章では、論文の構成を俯瞰するための序論、および研究目的を記述している。序論では、確率共振現象についての歴史的背景、次に神経系特に海馬錐体ニューロンの解剖学的・生理学的構造と、それに基づいて従来提案されたニューロンのモデルを紹介している。さらに中枢神経系における確率共振現象に関する従来研究を紹介し、本研究遂行の前段階として、露見した課題について言及した上で、本研究の目的を示している。

第2章には、本研究を遂行するための方法論をまとめている。すなわち、海馬ニューロンネットワークモデルの構築と出力された活動電位系列の、相互情報量としての評価手法について記述している。

第3章は、入力信号成分が1) 閾値未満である場合についての調査結果をまとめている。ランダムで閾値未満の微弱な興奮性シナプス様の入力信号が、シナプスの雑音成分によって改善されるか否かを、第2章で述べたニューロンモデルによるシミュレーションにより調査した結果を記述している。同様な研究は、2000年代初頭に入力信号成分を周期的なもののみならずランダムに生起する入力信号のもとでの調査はなされていなかった。計算機シミュレーションにおいて、ランダムな2種類の刺激（入力信号および背景ゆらぎ）をニューロンに与え、個々のニューロンの膜電位が記録された。その結果集合活動電位から推定された相互情報量は、特異的な強度のゆらぎ電流において最大になり、確率共振現象が確認された。またその強度は、生理学的実験から見積もられた先行研究からみて妥当な範囲であることが示唆された。

第4章では、入力信号を2) 閾値以上としたときの調査結果がまとめられている。これは、第3章と同様な手法を用いて行われたが、入力信号の振幅を閾値以上に設定した。その結果、閾値未満の入力信号が印加された場合とは異なるメカニズムで、相互情報量が特異的な強度のゆらぎのもとで最大になるという形での確率共振現象が観測された。同様な結果はすでに閾値をもつ抽象モデルにおいて観測されているものの、本調査結果により中枢神経系ニューロンモデルを用いて観測されたという意味で、閾値以上の入力信号に対する確率共振現象に関する知見を拡張することができたものと言える。

そして、ニューロンモデルの集団における確率共振現象という研究の枠組みを保ちつつ、3) 閾値未満ならびに閾値以上の成分の入力信号を混在させたときに、ゆらぎはその情報伝送にいかなる効果をもたらすのかの調査報告を第5章に記述している。これは、ネットワークを構成するニューロンの入力信号強度がすべて同じではないという状況を想定したものである。この研究は、閾値未満の入力信号に対する確率共振（第3章）と、閾値以上の入力信号における確率共振（第4章）を、同じ尺度を用いて観測したために成し得たものである。本調査の結果から、入力信号の強度、換言すれば閾値によらずに適切なゆらぎで情報伝送が改善されることが示された。

最終章である第6章では本論文の結論を述べている。第3～5章で海馬ニューロンモデルを対象として得られた成果をまとめるとともに、それらが海馬の機能である記憶形成に関する従来研究と矛盾しないことを述べている。

本研究を通して、閾値をもつ非線形系における情報伝送に対するゆらぎが積極的に寄与するという確率共振現象に関する従来の知見に、ニューロンの集団に印加される入力信号が閾値以上および閾値未満の混合であってもゆらぎがその情報伝送の改善に貢献するという知見が加わり、確率共振現象に対して新たな枠組を提案することができたといえる、これは生物物理学および情報科学の観点からみて意義のある成果であり、高く評価できる。さらに、記憶形成に関与することが知られる海馬のニューロンモデルを用いて遂行されたことから、記憶の形成に対するゆらぎの寄与に関して示唆を与えている。このことは、我々の知覚・認知の基盤である神経系における情報処理機構の理解を促すものであり、人間科学的に意義ある研究として評価でき、今後の発展が期待できる。

なお、本論文（一部を含む）が掲載された主な学術論文は以下の通りである。

- [1] 川口港, 簗弘幸, 百瀬桂子, D. M. Durand: 海馬 CA1 ニューロンネットワークでの確率共振現象による閾値以上の入力信号の情報伝送の改善, 計測自動制御学会論文誌, Vol.47, No1, pp.79-80 (2011)
- [2] 川口港, 簗弘幸, 百瀬桂子, D. M. Durand: 確率共振現象による海馬 CA1 ニューロンモデルでの情報伝送の強化:雑音の付加位置および周波数スペクトルに関する検討, 生体医工学, Vol.49, No.1, pp.176-184 (2011)
- [3] M. Kawaguchi, H. Mino and D.M. Durand: Stochastic Resonance Can Enhance Information Transmission in Neural Network, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* (in press).

以上より、本審査委員会は、本論文が博士（人間科学）の学位を授与するに十分に値すると認めるものである。

以 上