

早稲田大学審査学位論文
博士（人間科学）
概要書

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

2011年7月

早稲田大学大学院 人間科学研究科
川口 港
KAWAGUCHI, Minato

研究指導教員： 百瀬 桂子 准教授

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するものである。

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た。たとえば天敵や獲物の挙動に由来する微弱な環境の変化の感知(検出)が、それに無相関なゆらぎによって改善されるというものである。さらに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。

大脳辺縁系に位置する海馬は、20世紀の中頃から宣言的記憶の形成に関与することが知られた。一般に感覚情報は視床を中継して大脳皮質の感覚野において選択的に処理されながらも、その後嗅内野皮質を通じて海馬に投射される。海馬の内部はさらにいくつかの小領域に分けられ、その領域間を連絡する回路構造が存在することが知られているが、その回路構造への情報伝達の過程で領域内または領域間のニューロン同士の結合荷重が変化し、短期的な記憶がなされると考えられる。そして、海馬で一時的に保持された記憶は、大脳皮質に投射されることでより永続的な宣言的記憶となると考えられる。

このような認知的処理を担う基盤はニューロンにある。ニューロンの解剖学的・生理学的理解は19世紀末から進み、20世紀の中頃からはその興奮に関する現象論的な生物物理モデルが提案されるようになった。そして計算機シミュレーションによってその情報処理機構のさらなる理解への可能性が見出された。特に、海馬の錐体ニューロンは多数のランダムに生起するシナプスによる入力を受け、それらの入力が入力閾値に達することで出力としての活動電位を生成する。そのニューロンにおける活動電位の発火が、上記に述べた海馬の回路構造における情報伝達をもたらしている。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、前述のように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、海馬において学習過程が進むにつれて、入力信号成分のシナプスが閾値以上になる可能性が考えられる。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)の情報伝達が、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、またもし改善されるならばどの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た。そのとき、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とに分け、調査を行った。

本論文では、まず第1章として、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た。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。そして本研究の目的を示した。

第2章には、本研究を遂行するにあたりその方法論をまとめた。すなわち、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た。

第3章には、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調査した結果を記述した。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とみなして遂行されたものがあるものの、より生理学的に忠実な状況として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った。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。

次に、入力信号を閾値以上としたときの研究結果を第4章に記述した。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、本研究は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だろう。

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、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章に記述した。ネットワークを構成するすべてのニューロンが、同じ強度の入力信号を受け取ら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SR(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。本研究の結果から、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。

最後に、本論文の結論を第6章に記述した。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知見に、ニューロンの集団に印加される入力信号が閾上および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ものと考えられる。さらに、本研究では、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ることができたものと考えられる。