

氏 名	あし だ ごう 芦 田 剛
学位(専攻分野)	博 士 (情 報 学)
学 位 記 番 号	情 博 第 176 号
学位授与の日付	平 成 17 年 9 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	情 報 学 研 究 科 複 雑 系 科 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	神 經 細 胞 の 内 在 的 ノ イ ズ と 情 報 処 理

論文調査委員	(主 査) 教 授 磯 祐 介	教 授 片 井 修	講 師 久 保 雅 義
--------	--------------------	-----------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文では、神経細胞において存在する様々なノイズ源の中で神経細胞の内在的なノイズ源であるイオンチャネルの確率的挙動に着目し、数理モデルを用いた解析によって、イオンチャネルによるノイズが神経の情報伝達にどのような影響を及ぼすかについて検討を与えている。

第1章では、ノイズが神経細胞における情報処理・伝達の機能に与える影響について、関連する歴史的な背景、従来得られている種々の研究結果についてまとめている。

第2章では、確率共鳴の理論的側面をまとめ、例を通して確率共鳴の特徴と指標について紹介し、ノイズによって情報処理性能が向上しうることが述べられている。

第3章では、神経細胞の膜電位変化を記述するモデルとして、決定論モデルである Hodgkin-Huxley モデルと、イオンチャネルのランダムな挙動を表現する確率論モデルである Markov モデルについて紹介し、2つのモデルの違いについて概観している。

第4章では、第3章で導入した2つの神経細胞のモデル対し、入力に対する反応について、数値計算した結果が述べられている。特に、決定論モデルと確率論モデルの反応性の違いに着目し、確率論モデルに関しては入力の大きさと反応確率の関係を考察している。決定論モデルは、「一定以下の入力には反応せず、一定以上の入力には必ず反応する」という、いわゆる全か無かの反応をするのに対し、確率論モデルは「入力の大きさに応じて反応確率が変化し、反応確率はノイズ量に依存する」という性質を持っている。決定論モデルは無限個のイオンチャネルが細胞に存在するような状況に対応し、確率論モデルのある種の極限になっていることを指摘している。

第5章では、神経集団の情報伝達能力とノイズ量との関係について確率論モデルの数値計算を用いて考察している。第4章で得られた結果を用いて集団中の神経細胞の発火割合から入力信号の大きさを逆算する規則を作り、ノイズが逆算の精度に与える影響を調べ、最適なノイズ量の存在を明らかにしている。神経細胞の個数およびノイズ量をパラメータとして入力の推定精度を調べると、適度なノイズが存在する場合の方が、ノイズのない場合よりも推定精度が良くなることが示されている。すなわち、内在的ノイズの存在によって、入力に関するより多くの情報が伝達されることを示した。また、情報伝達に関わる細胞の個数によって、最適ノイズ量が変わることも示されている。

第6章では、情報理論の観点からモデル細胞群の情報伝達と推定の能力に対して検討を加えている。相互情報量の意味でも、Fisher 情報量の意味でもノイズが情報量を向上させることを確認し、これがモデル細胞集団での推定精度の向上とほぼ対応していることを指摘している。

第7章では、本論文で得られた結果のまとめおよび今後の課題および将来的な展望が述べられている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、神経細胞における内在的ノイズを確率現象の観点から解析し、数理モデルによる考察を通して、ノイズと神経の情報伝達との関係を論じている。本論文では、神経細胞における内在的ノイズとは、神経細胞膜表面に存在するカリウム及びナトリウムイオンを通す孔である「イオンチャネル」の確率的な開閉現象に起因するものと考え、議論を展開している。このイオンチャネルの確率的な開閉挙動は、離散状態・連続時間 Markov 過程を用いてモデル化が行なわれることが多く、本論文でもこのモデルが採用されている。ここでは、神経細胞膜電位の巨視的な観察に基づいて作られた、決定論的で連続な従来の数理モデルと対比し、確率論モデルにおける信号検出能力の優位性の観点から論じている。すなわち、微視的なイオンチャネルの確率的挙動に基づいて作られた、ランダムで不連続な神経細胞モデルと従来モデルを比較検討し、イオンチャネルの確率的挙動がもたらすノイズと、神経細胞の反応性および神経細胞集団の信号検出能力との関連の有無を明らかにしている。

一般的に、情報伝達を行なうシステムでは、ノイズの存在は情報処理の妨げになると考えられることが多い。しかしながら、神経系を含むある種の非線型システムにおいては、これまでも適量のノイズのもとで情報伝達能力が向上するという現象が知られており、この現象は確率共鳴と呼ばれている。本研究では神経細胞網における情報伝達での確率共鳴現象のメカニズムを明らかにするため、神経細胞に内在するノイズがより多くの情報伝達を可能とすることを、数理モデルを通して明らかにしている。これは、脳の活動では神経細胞に内在するノイズを確率共鳴を通して積極的に利用し、情報の伝達効率を高めている可能性を示唆するものであり、脳における高度な情報処理に対する理解の糸口を与えるものとも考えられる。また単一の神経細胞では伝達が不可能であると見なされていた入力強度やタイミング等の情報が、神経細胞の集団では確率共鳴を用いることで伝達可能になることを明らかにしている。この成果は、神経科学におけ集団的情報処理の枠組みにおいて、具体的な符号化の方法を提案するものであり、極めて重要な視点である。情報理論や神経科学等の融合領域における基礎研究として、意義あるものであると判断される。

よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年8月31日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。