

論文審査の結果の要旨

氏名 豊泉 太郎

脳による情報表現の解明は今世紀の科学の主要課題となり得る大きな問題である。神経細胞の活動にどれほどの情報が含まれるか、どのように読み取るか、また解剖学的・分子生物学的知見と機能の関係がどのように結びつくかを明らかにすることは重要である。本論文では活動電位を生成する神経細胞モデルを用い、その情報伝達に関する解析を行うことで、解剖学的・分子生物学的性質が、脳の情報表現に与える影響を理論的に解析した。更に、情報伝達の観点から最適なシナプスの学習則を導き、実験的に観測されている可塑性および大脳の発達に関する数理的な解釈を与えた。本論文は多様性を極める実験事実を少数の数理的原理をもとに記述する枠組みを与えることで、今後の生理実験の計画および計算神経科学理論の発展に対して大きな影響を与えることが期待されるものである。

本論文は、“ Information Theoretical Study on Neural Coding and Synaptic Plasticity” (和文題目 神経情報の符号化およびシナプス可塑性に関する情報理論的研究) と題し、全7章より成る。

第1章では、脳の情報表現とシナプス可塑性の背景として、先行研究を紹介し、本研究の位置付けを明確にしている。

第2章では、神経細胞集団からスパイク列を観測した場合にどの程度の精度で刺激のパラメーターを推定できるかを、フィッシャー情報量を用いて定量的に評価している。先行研究の多くが発火率からのパラメーター推定を問題にしているのに対し、本章では発火率から得られる情報と発火時刻から得られる情報を個別に評価し、それらがシナプス結合や神経細胞の不应期といった特徴に応じてどのように変化するかを導いた。また、定常な刺激に対してフィッシャー情報量を見積もった先行研究は多いが、本章では時空間構造をもつ刺激の推定に関してフィッシャー情報量を見積もり、さらに最適なシナプスの結合を導いた。

第3章では、出力スパイク列がポアソン点過程で近似できるような弱い入力シグナルの場合に、入出力スパイク列間の相互情報量最大化原理から得られるシナプス学習則を導いている。得られた学習則は入出力スパイク列に依存するが、あるスパイク対を観測したもとの、他のスパイクについて条件付平均を行うことにより、生理学的に観測されているスパイク時刻依存性と共通の性質が得られることを示した。入出力発火率間の相互情報量を最大化する学習則は先行研究として発表されているが、今回これをスパイク列

間の相互情報量に拡張したことは新しい成果である。

第4章では、発火率に対する制約の項を前章の学習則に付加することにより、情報量最大化原理で問題となる発火率の発散を回避し、学習の収束状態を議論できることを示した。発火率に関する制約条件によりシナプス間の競合が引き起こされ、これによって大脳で見られるような神経細胞の選択的応答が、入力情報によって自己組織化的に形成されることを明らかにした。

第5章では、前章までの弱シグナル仮定を緩和することで、発火率に制約条件のある情報量最大化シナプス学習則を一般化した。得られた学習則は、実験的に確かめられている、発火時刻・膜電位・平均発火率依存性をもち、生理学的に実現可能な形で記述される。特に出力発火率が過去の出力スパイク時刻に依存しない場合において、本学習則が生理学的に得られている発火率依存性の可塑性（Bienenstock-Cooper-Munro 則）と一致することが示された。この発火率依存性は多くの神経システムで普遍的に観測されているもので、本章でこのシナプス可塑性と情報量最大化の関係を、初めて明示的に示したことは極めて重要である。

第6章では、前章までに適用していた上下限によるシナプス加重の制約を、代謝コストの形で置き換えることによりシナプス加重の分布を評価している。これにより、生理学的に観測されているスパイク時刻依存性の可塑性が再現できることが示された。また、このシナプス加重に対する境界条件の違いは、学習の終状態の安定性に関しても影響を与えることが示されている。また、シナプス結合に対する一様結合状態と選択的結合状態の間の双安定性は、選択性の形成時期及び記憶の保持に関して重要な役割を果たすことを明らかにした。

第7章では、前章までの結論をまとめるとともに、今後の発展の可能性について議論している。

以上のように、本論文は神経細胞による情報表現とシナプス可塑性の理論及び応用に関して大きな成果を上げ、複雑理工学上貢献するところが大きい。なお、本論文の第2章は合原一幸および甘利俊一、第3章から第6章は Jean-Pascal Pfister、合原一幸、Wulfram Gerstner との共同研究であるが、論文提出者が主体となって問題を提起しその導出を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。