

審査の結果の要旨

氏 名 横 田 亮

本研究では、神経集団による情報表現において、個々の神経細胞の反応特性の多様性と神経集団の同期性の意義を考察した。具体的には、ラットの聴覚野を実験モデルとし、その神経反応から、個々の神経細胞の符号化能力と細胞集団活動の同期性のばらつきを定量的に調べた。また、これらの特徴が、学習により、どのように変化するかを調べた。さらに、生理実験で得られた知見が、どのような神経回路の特徴に起因するかをシミュレーションで検証した。

第一章「序論」では、研究の背景として、大脳皮質がどのような特徴を有しているかを説明し、その特徴が環境適応の観点からどのような利点をもたらすかについて議論している。その際のキーワードとして、神経集団内の「多様性」を取り上げている。次に、大脳皮質内の情報処理のメカニズムについて議論し、上述の特徴が情報処理の観点からどのような利点を生み出すかについて議論している。さらに、既存の集団符号化の方法について説明し、神経集団と個々の神経細胞の活動を同時に評価する指標として「同期現象」に着目する意義を説明している。この同期現象は多様性と密接に関連するはずであるが、多様性と同期性の関連を調べた先行研究が少ない。このことを問題視したうえで、本研究の目的として、(i) 感覚野における神経反応の多様性の特徴を明らかにすることと、さらに、(ii) その多様性を生み出す同期現象のメカニズムを明らかにすることを導出している。

第二章「行動・生理実験」では、聴覚野内の応答の多様性と同期性が、学習によりどのように変化するかを定量的に評価するために、オペラント条件付けを用いた行動実験と細胞外計測法を用いた生理実験を行った。まず、古典的な評価方法により、聴覚野の周波数マップを明らかにした。次に、個々の神経細胞の情報処理の多様性を評価する指標として相互情報量を導入し、周波数局在構造内での多様性を定量評価し、さらに、その多様性が学習によりどのように変化するかを調べた。最後に、神経集団による活動の多様性を考察するために、個々の神経細胞の発火電位のタイミングが、平均的な集団活動を示す局所電場電位に対して、どの程度揃うかを定量的に評価した。その結果、個々の神経細胞の応答特性も、細胞間の同期性も、周波数マップに依存しており、さらに、

学習により、周波数局在構造とともに柔軟に変化することが示された。

第三章「シミュレーション」では、前章の考察より、学習による可塑的な神経応答の変化の要因が、興奮性細胞と抑制性細胞のバランスの変化にあるとする仮説を導出し、この仮説を二つのシミュレーション実験で検証した。一つのモデルでは、ランダム結合した神経回路の自己組織化において、興奮と抑制のバランスが同期性にどのような影響を与えるかを調べた。その結果、このシミュレーションモデルにより、生理実験で調べた神経活動の同期性を説明できること、さらに、同期性の変化は、個々の細胞のダイナミクスに多様性がある場合に顕著になることがわかった。もう一つのモデルでは、興奮と抑制のバランスが、聴覚野の周波数局在構造を模したネットワークにおいて、同期性にもたらす影響を検証した。このモデルでも、興奮と抑制のバランスが、ネットワークの同期性に決定的な影響を与えていること、さらに、その影響は生理実験の結果と合致することが示された。

第四章「考察」では、これまでの実験結果を総括し、先行研究の知見と比較しながら、総合的に議論している。特に、聴覚野の応答の特徴や位相同期性の意義に説明を加え、多角的な視点から、学習による応答の変化の原因を追究し、情報処理の確実性と効率性のバランスを議論している。

第五章「結論」では、本研究で実施した研究項目の概要を整理し、それらから得られた知見を結論として知識化している。生理実験とシミュレーション実験の結果を多角的に考察した結果、(i) 学習は、経過日数と共に情報処理の確実性と効率性のバランスを変化させ、神経応答の多様性はこのバランスに対応して変化すること、(ii) この変化は、ネットワーク内の抑制・興奮間のバランスに起因することを本研究の結論として結んでいる。

上述の要点より、学習経過に伴う符号化能力や同期性のばらつき（多様性）は、聴覚野の情報処理の特徴を如実に反映している。すなわち、学習の途上では確実性を、学習の成立後では効率性を、それぞれ、優先している。このように、神経集団による情報表現において、個々の神経細胞の反応特性の多様化は、情報処理の確実性と効率性のバランスを調整するために、極めて重要な役割を担っている。本研究で注目した神経集団による情報表現方法は、聴覚野にとどまらず、視覚や体性感覚など感覚野における普遍的な知覚情報処理の一端を解明する手がかりになる。その点で、本研究には、神経科学や認知科学分野において、学際的な学術的な貢献が認められ、今後の発展も期待できる。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。