

論文の内容の要旨

神経集団による符号化の多様性と同期性の意義

氏名 横田 亮

大脳皮質内の神経細胞は、領野やコラム構造のように、似通った応答特性を持つ細胞同士で神経集団を形成すると考えられてきた。しかし、近年、同じコラム内の神経細胞でも、多様な応答特性を示すことが指摘されている。そこで、本研究では、各コラム内の応答特性の多様性を符号化能力に注目して定量化し、学習という可塑性を与えることにより、その変化の仕方から多様性の意義について考察した。また、神経集団の多様性と冗長性を区別する指標として、神経集団の同期性にも注目した。さらに、同期性の変化が、どのような神経回路の特徴から生じるかをシミュレーションにより検証した。本研究で実施した研究項目と、それらから得られた知見を下記にまとめる。

I) 本研究で行った実験

・行動・生理実験による神経応答の計測

オペラント条件付けにより、ラットを未学習・学習途上(Day4)・学習成立後(Day20)の3つの学習群に分け、各段階で様々な純音刺激に対する神経応答を一次聴覚野全域より計測した。計測した神経応答を用いて、各計測点で相互情報量(Mutual information;MI)と Circular variance(CV)を計算し、個々の神経応答の符号化能力と集合応答(局所電場電位, LFP)に対する同期性をそれぞれ定量化した。

・シミュレーションによる神経回路・応答の評価

i) 神経ダイナミクスに多様性を持つ神経回路

STDPにより自己組織的に再編された回路構成を、同多様性を想定しない場合と比較した。また、多様性を考慮した神経回路において、コリン作動性受容体活性の効果として抑制性細胞から興奮性細胞への結合強度を10分の1に減弱してトレーニングを行い、そのトレーニング前後に、あるいは、その最中において、正弦波入力に対する神経応答の同期性を評価した。

ii) 周波数局在性をモデル化した神経回路におけるコリン作動性受容体活性

聴覚野のコラム構造をモデルに組み込んだ後、コリン作動性受容体活性の効果として、興奮・興奮間の水平結合、興奮・抑制間の水平結合、視床・皮質間の求心性結合を先行研究の結果をもとにそれぞれ調整した。

II) 本研究で得られた知見

1) 感覚野における神経応答の多様性の特徴

コラム内の神経回路は、個々の細胞に多様性を持つ。また、その多様性の度合いは、コラムの大きさ(細胞数)と相関した

・ 行動・生理実験による多様性の評価

MI, CVを計算した結果、低い周波数選択性(Best frequency; BF)領域よりも高BF領域でMI, CVはより広いバラつきを示した。これは、BFコラム内の神経細胞群に応答の多様性が存在するのと同様に、BFコラム間にも多様性を生むことで情報処理の効率化を実現していると推察される。また、このBF依存的なMI, CVの分布は学習経過中も存続したが、学習途中でMIは増加・CVは減少し、学習成立後でMIは減少・CVは増加した。さらに、学習の全段階で、各指標とBF領域の面積は相関する傾向にあった。これは、BFコラムの面積、すなわち、神経細胞群の数に、応答の多様性が相関することを示唆する。

2) 多様性を生み出すメカニズムとしての同期現象

個々の神経のダイナミクスに多様性を想定した場合の結合強度分布は逆指数関数的になり、想定しない場合は正規分布に近くなった。これは、先行研究から、より生理実験結果に則した結果であることが分かった。また、多様性を想定した場合は、抑制性細胞と興奮性細胞のバランスの変化による同期性の変化がより顕著になった。これは、多様性を考慮した場合の方が、学習による効果が大きいことを示唆する。

・ 学習による多様性の調整原理

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る。神経応答の多様性はこのバランスに対応して変化する。また、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。

a) 行動実験の示す応答の変化

偽陽性率の増加が学習途上(Day4)で減少に転じたことから、学習には少なくとも2つのステップが存在することを示唆する。

b) 生理実験の示す多様性の意義の変化

学習経過に伴う MI, CV の非単調な変化は、多様性の意義に関して以下のことを示唆する。学習途上では、個々の神経細胞の持つ刺激に対する反応性を増加させる(MI の増加)と共に、集合応答に対する同期性を向上させること(CV の低下)でノイズに対してより頑強に入力信号に対してより確実に反応できるようになり、一方で、学習成立後では、個々の神経細胞の持つ刺激選択性を低下させる(MI の低下)と共に、集合応答に対する同期性を低下させること(CV の増加)で、集団で刺激情報を符号化する際の効率性を上昇させた。

c) シミュレーションの示す生理実験との整合性

神経ダイナミクスに多様性を持つ神経回路において、コリン作動性受容体活性の効果を評価したところ、トレーニング中の神経応答はトレーニング前よりも同期的に、トレーニング後の神経応答はトレーニング前よりも非同期的になった。これは、本実験における生理実験結果と一致した。また、周波数局在構造をモデル化した神経回路において、コリン作動性受容体活性の効果を評価したところ、興奮性細胞間の結合強度と抑制性神経から興奮性神経への結合強度が釣り合いな場合、それらが均衡している時と比べて、LFPs の各周波数に対する第一スパイクの位相固定度合いが試行間でバラつかなくなった。これも、本実験における生理実験結果と一致した。

上述の要点より、学習経過に伴う符号化能力・同期性のバラつき（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。