

TSUBAME 共同利用 令和4年度 学術利用 成果報告書

発達期多元自発活動の数理モデルとその学習理論の構築

The mathematical model and learning theory for pluralistic brain activity in early development

早川 隆

Hayakawa Takashi

日本大学 医学部 生体機能医学系 薬理学分野

Department of Pharmacology, School of Medicine, Nihon University

<https://www.med.nihon-u.ac.jp/department/pharmacology/>

本研究では、課題責任者の科研費プロジェクト「発達期多元自発活動の数理モデルとその学習理論の構築」の遂行のために、大脳皮質局所神経回路モデルの数値シミュレーション及びその神経回路を用いた機械学習を GPU アクセラレーターを用いて大規模かつ高速に実行するシミュレーターを作成した。これを用いて発達期に形成されるとされるモジュール構造を持つ局所神経回路モデルが、学習後に実験的に観察されるモジュールごとの同期的なダイナミクスを再現すること、そしてこの振る舞いが新たに構築した統計力学理論によって記述できることを示した。

In the present study, I developed a generic program code for simulation of mammalian neocortical-circuit models and machine learning using these models, for the goal set out in a KAKENHI grant project entitled “the mathematical model and learning theory for pluralistic brain activity in early development.” This fast simulator that takes full advantage of GPU accelerators allowed me to show that a cortical-circuit model with module structures exhibits module-wise synchronous dynamics after learning as do neocortical circuits of animals, and that these dynamics can be described by a newly developed statistical mechanical theory.

*Keywords:* mammalian neocortex, computational neuroscience, machine learning, statistical mechanics, large-scale simulation

背景と目的

本課題は研究課題責任者の早川が同名の学術変革領域(B)科研費課題を遂行するためのものである。以下に科研費課題の背景と目的を述べるが、本共同利用課題は、以下の科研費課題の目的を達成するために、TSUBAMEの持つ複数GPUを利用した大規模計算環境を利用し、脳神経回路モデルの高速シミュレーションによって研究を加速しようとするものである。

本研究の背景としてはまず、近年になって発達初期の脳回路の活動様式が実験的に観察できるようになり、この時期の動物脳が従来想像されていたものよりダイナミックで普遍的な多元自発活動を示すことが明らかになってきたことがある。学術変革領域(B)の共同研究者の上阪・水野らはこの時期の脳活動が、発達と共に、同期的な活動から非同期的な活動に切り替わっていく様子を世界に先駆けて観察することに成功していた[1,2]。

一方、課題責任者の早川は、脳波などに見られるよう

な大脳皮質の神経細胞集団が示す、同期的かつ不規則/規則的な振動現象の起源を記述できる可能性のある新しい統計力学理論を世界に先駆けて構築していた[3]。また、学術変革領域(B)の共同研究者の千葉は、集団同期現象を取り扱う際に広く用いることができる数学理論を世界に先駆けて構築していた[4]。

このような領域の研究者達の先行研究と並行して、近年、神経回路の機械学習の研究者達が、統計力学理論を用いて深層学習の振る舞いを解析しており、一定の初期条件から学習を開始すると、その後の学習性能が高くなることを理論的に示していた[5]。

以上の背景を踏まえて、本課題で研究代表者は、動物脳の初期状態である発達初期の脳活動は、リカレント神経回路である大脳皮質回路が何らかの意味で最適な状態に調整された結果として現れているのか、という根本的な疑問に対して、共同研究を通して答えようとする。より具体的には、先行研究を踏まえて大脳皮質の神経回路モデルを構築し、シナプス結合強度分布な

どのパラメータを発達初期の各段階の動物脳における実験結果と合致するものに設定した際に、領域の共同研究者らがこれまでに観察してきた現象を再現できるかどうかを確認する。そして再現された同期活動から非同期活動への転移が、神経回路モデルにその後機械学習を行わせた際の学習性能にどのように影響するかを、課題責任者とその他のグループが先行研究で構築した統計力学理論及び数値シミュレーションの技術を用いて調べる。これによって、脳の非常に柔軟な情報処理能力の根源を探ると同時に、フィードフォワード神経回路に比べてあまり理論的に明らかにされてこなかったリカレント神経回路の機械学習理論を打ち立てることを目的とする。

#### 概要

発達を通して大脳皮質局所回路に形成されるモジュール構造を組み込んだ神経回路モデルとその学習の数値シミュレーションを GPU アクセラレーターを利用して大規模かつ高速に実行できるシミュレーターを構築した。神経発火頻度が常微分方程式に従い連続的に時間変化するモデル及び、現実の脳神経細胞の発火活動機構を取り入れた精緻モデルの 2 通りのシミュレーターを作成し、これらのシミュレーション結果を裏付ける統計力学理論も構築した。これらを用いて大脳皮質神経回路の多角的自発活動と学習の一端が解明された。

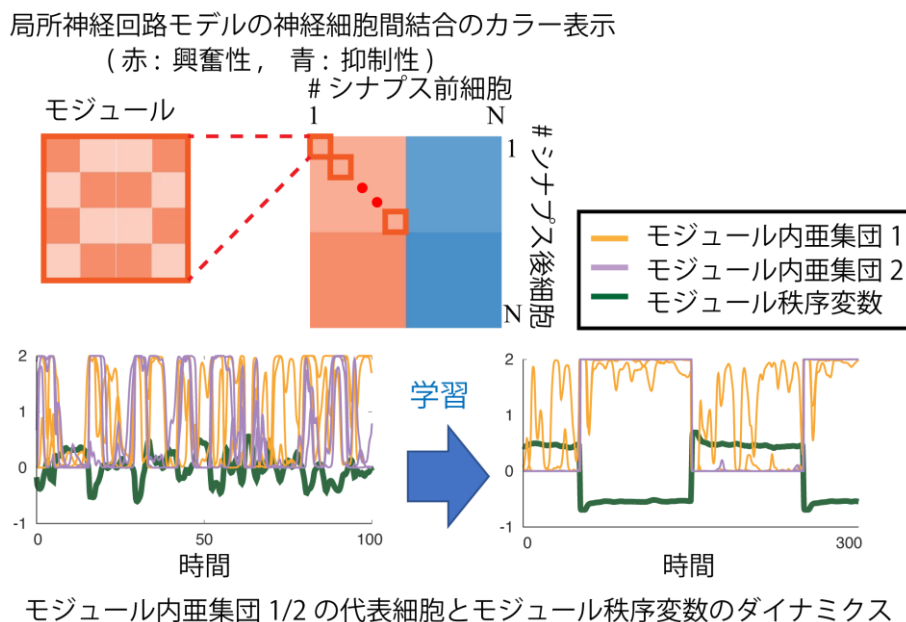
#### 結果および考察

令和4年度は背景と目的で述べた本研究における根本的な疑問に答えようとするにあたって、どのような大

脳皮質の神経回路モデルを立てれば良いのかを追究した。共同研究者との議論を通じて、先行研究で課題責任者が調べてきた無構造の局所神経回路モデルに則り解析・議論を進めるだけでは、観察される現象を十分に説明しきれないという結論に至った。そこで、先行研究において構築した神経回路モデルと統計力学理論を、実際の大脳皮質神経回路と同様にモジュール構造を持つ場合に拡張した。というのも、成体の脳では神経回路はこのようなモジュールごとに同期活動を示しており、それが確率的な情報を表現していることが最近の研究で明らかになってきているからである[6,7]。従って、本研究で問うべき課題は、無構造の大脳皮質から学習に伴ってこのモジュール構造がどのようにして現れるかである。

そこで課題責任者は、課題責任者自身が先行研究で用いた個々のニューロンの神経発火率(0~2 の連続値をとる)が常微分方程式で表される単純モデル、本研究課題の主な対象である大脳皮質感覚野の神経細胞の発火機構をより精緻にモデル化したリアリスティックモデルの両方をベースに、神経結合が無構造及びモジュール構造有りの両方の場合のシミュレーションを実行でき、さらに単純モデルの場合は機械学習課題も実行できるような数値シミュレーターを C++・OpenACC を用いて構築することに成功した。例えば、下図に示すようにモジュール構造を持つ単純モデルにおいて、モジュールの秩序変数が特定のダイナミクスを示すよう学習する数値シミュレーションを実行できる。発達過程を想

図：モジュール構造のある局所神経回路モデルの学習シミュレーションの一例



定し様々なモデルの予備的なシミュレーションを行なったが、いずれの場合も GPU アクセラレーターによって大幅な計算速度の向上が得られた。

単純モデルをベースとした場合、モジュール構造を持つ場合に神経細胞集団がモジュールごとに同期活動する様子を統計力学理論を用いて記述することにも成功し、このシミュレーターの結果を理論的に裏付けることにも成功した。また、モジュール構造を持った場合、モジュールの同期による確率表現を変更する学習は、新たな表現を学習し直す場合に比べてはるかに高速に行うことができることも、数值的・理論的に示した。また単純モデルの範囲で、成体の情報表現として知られる持続的・漸増的な集団発火活動を機械学習の結果として再現することにも成功した。これらの結果は過去の実験観察事実と定性的にはよく整合し、単純モデルであることによる限界はあるが、成体脳の学習の本質を捉えている可能性が示唆された。

次に、正則発火ニューロン・高頻度発火ニューロン・低域値発火ニューロンの 3 種類から構成される、現実の大脳皮質神経細胞の発火活動機構をある程度忠実にモデル化した精密モデルのシミュレーターを先行研究[8]を参考に構築した。このシミュレーターでも、単純モデルの場合と同様に、モジュールごとの集団同期活動を GPU アクセラレーターを用いた大規模かつ高速な数値シミュレーションによって再現し、これを統計力学理論によって裏付けることに成功した。

#### まとめ、今後の課題

令和 4 年度は研究プロジェクトの 1 年目ということもあり、基盤となるシミュレーター及びそれに対する理論の適用を確認する作業が主となった。令和 5 年度はいよいよ、このシミュレーターのパラメータや構造を発達初期のものに連続的に変更していった際に、どのように活動が変化していくのかを調べていく。また、無構造な発達初期の神経回路モデルに機械学習を行った際にモジュール構造が現れ、確率的情報表現が可能となるのか、その際の最初の神経回路モデルのパラメータはどのような値に取るべきか、などを数値シミュレーション・理論解析を駆使して調べていく。

#### 参考文献

- [1] Ikezoe *et al.* (2018) *Cell Rep.*
- [2] Uesaka *et al.* (unpublished data)
- [3] Hayakawa & Fukai (2020) *Phys. Rev. Res.*
- [4] Chiba (2015) *Adv. in Math*
- [5] Bahri *et al.* (2020) *Ann.Rev.Cond.Matt.Phys.*
- [6] Ko *et al.* (2011) *Nature*
- [7] Shi *et al.* (2022) *Nat. Comm.*
- [8] Bernardi *et al.* (2021) *PLoS Comput. Biol.*