

## PRESS RELEASE

公立はこだて未来大学 入試・広報・就職課

〒041-8655 函館市亀田中野町 116 番地 2

TEL 0138-34-6444 FAX 0138-34-6383

E-mail: pub@fun.ac.jp

URL: <https://www.fun.ac.jp>

本件の取扱いについては、下記の解禁時間以降でお願い申し上げます。

新聞： 11月10日（ロンドン時間 10AM）

テレビ・ラジオ・インターネット：11月10日（ロンドン時間 10AM）

本学HP掲載： ☒ 要 ☐ 否

### 自発的な脳活動の「ゆらぎ」が学習速度を決めるメカニズムを 理論的に解明

ー 学習の速さは「ゆらぎ」と「方向性」で決まる ー

#### 研究成果のポイント

- 脳にある神経回路では、学習前の自発的な神経活動のゆらぎ（変動）が学習の速さに関係することを理論的に示した。
- 統計物理学の「ゆらぎ-応答関係（Fluctuation-Response Relation）※1」に着想を得て、ゆらぎと学習速度を結ぶ新しい理論式「ゆらぎ-学習関係（Fluctuation-Learning Relation）※2」を導出。
- 複数の人工神経回路モデル（再帰型ニューラルネットワーク, Hebb 学習, Hopfield モデル等）で数値的に検証し、理論式が幅広い条件で成立することを確認。
- 自発的活動と課題関連パターン方向の「幾何学的関係」が学習効率を規定するという、神経科学と AI の両分野に共通する一般原理を提示。

#### 研究成果の概要

公立はこだて未来大学システム情報科学部の栗川知己准教授、コペンハーゲン大学ニールス・ボーア研究所の金子邦彦教授らの研究グループは、脳にある神経回路では、学習の速さが学習前の神経活動の「ゆらぎ」とその向きによって決まることを理論的に示し、学習の仕組みを説明する新しい一般原理を発見しました。

（背景）

私たちの脳は、外部刺激がなくても絶えず自発的な神経活動を示しています。最近の実験研究では、学習前の神経活動や行動の変動が大きいほど、学習が速く進む傾向が報告

されています。しかし、こうした「ゆらぎ」と学習速度の関係を説明する一般的な理論は存在しませんでした。

#### （研究手法）

本研究では、統計物理学の枠組みを応用しました。神経回路モデル（再帰型ニューラルネットワーク）を用いて、学習初期の重み変化と自発的活動のゆらぎを解析し、学習速度との関係式を導出しました。

#### （研究成果）

研究チームは、自発的活動のゆらぎと学習速度の間に成り立つ関係式（Fluctuation-Learning Relationship, FLR）を一般的な学習則に成り立つ関係（FLR1）、と具体的な学習則（Hebb 則）に成り立つ関係（FLR2）に分け、

- ・ FLR1：神経細胞同士の協調的な自発的活動の度合い（共分散）と学習速度の比例関係
- ・ FLR2：目標方向に沿った活動の分散が大きいほど学習が速い

という2つの理論式を提示しました。さらに、複数の数値実験により、これらの関係が線形近似を超えて成立することを確認しました。特に、事前に多くのパターンを学習済みのネットワークでは、既存のゆらぎ構造が新しい学習を加速することを示しました。

#### （今後の展望）

本理論は、脳科学と AI の両分野をつなぐ「学習効率の一般原理」を与えるものです。自発的神経活動の解析から学習性能を予測できる可能性があり、将来的には脳-機械インターフェース（BCI）や人工知能の訓練効率化への応用が期待されます。

## 論文発表の概要

掲載誌：Nature Communications

公表日：2025 年 11 月 10 日

研究論文名：Fluctuation–Learning Relationship in Recurrent Neural Networks

著者：栗川知己\*（公立はこだて未来大学），金子邦彦（コペンハーゲン大学／東京大学）

\*:責任著者

## 論文の概要

私たちの脳は、外部からの刺激がないときでも絶えず活動しており、この「自発的な神経活動」は長らく“ノイズ”や“無駄な活動”と考えられてきました。ところが近年の神経科学研究では、この自発的活動が、感覚刺激に対する反応や学習の成立に深く関わっていることが次第に明らかになっています。例えば、脳-機械インターフェース（Brain-Computer Interface, BCI）の実験では、学習前の神経活動のゆらぎが大きい方向に学習させると学習速度が速いことが報告されています。これらの知見は、神経活動や行動の「ゆらぎ」が、学習において重要な役割を果たしていることを示唆しています。

このような現象を理解するうえで、脳活動の背後にある「ゆらぎ」と「応答」の関係は注目すべき概念です。統計物理学の世界では、アインシュタインや久保亮五らにより「ゆらぎ-応答関係（Fluctuation–Response Relation）」が確立されました。これは、ある系が外力にどの程度応答するか（応答感度）は、その系が外力のない状態でどれだけ自発的にゆらいでいるか（ゆらぎ）に比例する、という原理です。たとえば、水中の小さい粒子がどのくらいランダムに動いているかを測れば、その水中の粒子に小さな力を加えたときの流動性を予測できる、というような関係です。

これまでも、神経活動の自発的変動と刺激応答の関係を調べる研究は存在しましたが、それらは「入力に対する一時的応答」や「ネットワークの安定性」に焦点を当てたものであり、「学習の速さ」と直接結びつける一般的理論は存在しませんでした。そこで本研究では、神経回路の「学習※3」という過程そのものを“応答”とみなし、学習前の自発的ゆらぎと学習速度の関係を理論的に結びつけることを目的としました。脳の内部で自発的に生じる変動が、どの方向にどのくらいの大きさに起こっているか——その「ゆらぎの幾何学的構造」が、実際の学習効率を決定しているのではないかという着想に基づき、理論と数値解析の両面から検証を行いました。

## 研究成果

研究チームはまず、学習の初期段階における結合行列の変化  $\Delta J$  と、神経活動の学習による変化  $\Delta x/\Delta t$  の関係を解析し、 $\Delta x/\Delta t$  が学習前の神経活動のゆらぎの共分散行列と  $\Delta J$  に比例することを示しました（これを **FLR1** と呼びます、図1）。

さらに、**Hebb** 型の学習則（※4）を仮定した場合、学習速度は「自発的ゆらぎの大きさ」と「目標方向（学習すべき出力）」の幾何学的関係によって決まることを示す、より具体的な式（**FLR2**）を導出しました。つまり、学習前の自発的活動のゆらぎが大きく、その方向が学習対象の方向と一致しているほど、学習が速く進むという結果です（図2）。

この理論を、さまざまな条件下で検証しました。単純な周期運動（**cos** 波形）の生成や、2次元軌跡を描く文字生成タスクなど、複雑な動的課題でも、理論が正確に学習速度を予測することが確認されました。また、学習前にすでに複数の入出力パターンを記憶しているネットワーク（**pre-embedded model**）では、既存の学習パターンと新しい課題の幾何学的整合性が高いほど、学習が速いことを数値的に確認しました。

この結果は、「多くの運動パターンを経験している個体ほど新しい動作を早く習得できる」といった実験結果とも一致します。また、本理論は線形近似を超えて成立することも確認され、神経系や人工ニューラルネットワークの幅広い学習過程に適用できる普遍的な枠組みであることが示されました。

### （今後の展望）

本研究は、脳の学習を支える一般的な数理原理を明らかにした点で意義深い成果です。自発的神経活動のゆらぎを解析することで、学習能力を予測したり、学習効率を最大化する方向を設計することが理論的に可能になります。今後は、脳-機械インターフェース（**BCI**）における個体差の説明や、人工知能の効率的な訓練スキームへの応用が期待されます。また、注意状態や覚醒レベルと学習速度の関係を定量化する新しい神経科学的研究の基盤にもなると考えられます。

## 補足解説

※1 **Fluctuation-Response Relation**（ゆらぎ-応答関係）：物理学において、外力に対する系の応答は、その系の自発的ゆらぎの大きさに比例するという関係。

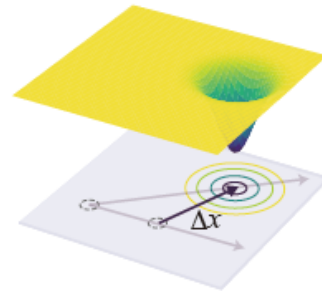
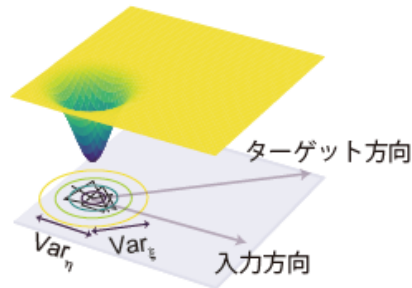
※2 **FLR**（**Fluctuation-Learning Relationship**）：本研究で新たに導入された概念。神経系における「学習速度＝ゆらぎ×方向性」による理論的關係を表す。

※3 神経回路の学習：ニューロン同士の「つながりの強さ（シナプス、結合重み）」を少しずつ変化させることによって、外部からの刺激や入力に対して望ましい出力を生み出せるようにする過程を指す。

※4 Hebb 型の学習則：シナプス前後の神経細胞の神経活動で、シナプスの強さの変化が決まる学習則。機械学習でよく用いられる学習則（バックプロパゲーション法など）よりも、より生物学的に妥当と考えられている。

自発的神経活動をつくるランドスケープ

学習によって変化したランドスケープ



$Var_{\xi}$ : ターゲット方向のゆらぎの大きさ

$\Delta x$ : 学習による神経活動の変化

$Var_{\eta}$ : 入力方向のゆらぎの大きさ

図 1： 学習速度と自発活動のイメージ図

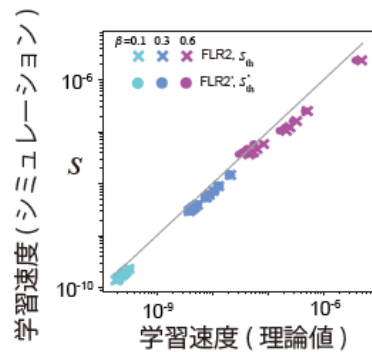


図 2：学習速度の理論値 vs 数値シミュレーション

## お問い合わせ先

所属・職・氏名：公立はこだて未来大学 准教授 栗川知己

E-mail：kurikawa@fun.ac.jp

TEL：0138-34-6489