

# 爆発的記憶想起を実現するニューラルネットワークを開発

## —曲がった統計多様体がもたらす新理論—

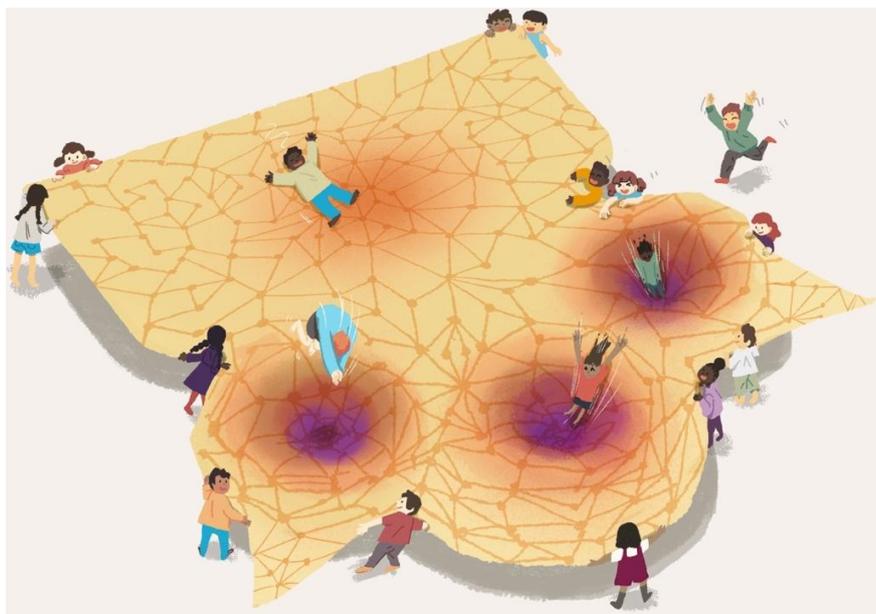
### 概要

物理・生命・社会といった複雑なシステムでは、構成要素が同時に関係し合う高次相互作用<sup>1</sup>が、創発的な変化や多様な振る舞いを生み出すうえで本質的な役割を果たしていることが明らかになってきています。こうした高次相互作用は脳のような生物のネットワークにおける情報の表現や、人工ニューラルネットワークの性能向上にも関与していると考えられています。しかし、それらを一貫した原理に基づいて扱える理論的枠組みは、これまで十分に整備されていませんでした。

京都大学大学院情報学研究科の島崎秀昭准教授（兼：北海道大学人間知・脳・AI研究教育センター客員准教授）、バスク応用数学センター（スペイン）の Miguel Aguilera 研究員、Araya Inc.（東京）の Pablo A. Morales 主任、サセックス大学（英国）の Fernando E. Rosas 助教らによる国際共同研究チームは、統計物理学の最大エントロピー原理<sup>2</sup>を拡張し、曲がった統計多様体<sup>3</sup>上で定義される新しいニューラルネットワークモデル「Curved Neural Networks（曲がったニューラルネットワーク）」を提案しました。このモデルは Rényi（レーニ）エントロピー<sup>4</sup>に基づく変形指数分布を用いることで、従来のペア相互作用のみを記述したネットワークでは実現できなかった高次相互作用を自然に組み込むことができる新しい枠組みです。

本研究ではこの新しい曲がったニューラルネットワークを通じて、以下の3つの重要な現象を発見しました。(1) 記憶想起状態における従来と異なる爆発的相転移<sup>5</sup>の発現、(2) 記憶検索を飛躍的に加速する自己調節アーニーリング<sup>6</sup>機構、(3) 記憶容量とロバスト性の柔軟な制御が可能であることの発見、です。これらの発見は記憶の表現や検索の効率を飛躍的に向上させる新たな仕組みを提供するものであり、今後の人工知能技術の発展に寄与することが期待されます。

本成果は2025年7月24日に、英国の国際学術誌「*Nature Communications*」にオンライン掲載されました。



曲がったニューラルネットで遊ぶ子どもたちで爆発的記憶想起を表現したイメージ図 (Illust. Robin Hoshino)

## 1. 背景

複雑な物理・生物・社会システムでは、構成要素同士の単純なペア相互作用（2次の相互作用）では記述できない高次の相互依存性がしばしば見られます。近年の研究は、高次相互作用が例外ではなく普遍的に存在し、それが双安定性やヒステリシス、爆発的相転移といった集団的な非線形挙動を生み出していることを示しています。

なかでも、高次相互作用は生物のニューラルネットワークにおけるスパースな活動や臨界的な振る舞いを生む基盤とされており、人工ニューラルネットワークにおいても記憶容量や表現能力を高める重要な役割を果たしています。現代的な連想記憶モデルでは人工ニューロンの非線形活性化関数を通じて実質的に高次相互作用を実装しており、トランスフォーマーや拡散モデルといった最先端の深層学習モデルが高い性能を発揮する背景にもこの仕組みが関与していると考えられています。

しかしながら、高次相互作用をすべて明示的に導入すると計算量が爆発的に増大してしまうため、理論解析を行うには特定の次数に限定したモデルや単純化された仮定に依存せざるを得ませんでした。その結果、高次相互作用の多様な効果を原理的に扱える、汎用的かつ解析可能な理論枠組みは十分に整備されてきませんでした。

本研究ではこの課題に対して、通常はシャノンエントロピーに基づいて用いられる最大エントロピー原理を Rényi（レーニ）エントロピーへと拡張し、統計分布そのものを非線形に「曲げる」ことで、すべての次数の高次相互作用を自然に包含できる新たなモデルを提案しました（図1）。この曲がった統計多様体上に構成されたニューラルネットワークにより、異なる記憶保持状態に移行する際の爆発的相転移と呼ばれる急激な変化や複数の記憶の多安定性といった複雑な記憶動態の仕組みが明らかになりました。

このモデルでは、統計多様体の曲率（変形パラメータ）がニューラルネットワークの記憶動態に強い影響を与えることが明らかとなりました。特にネットワークの状態に応じて“温度”が自己調節されるという新たなメカニズムが、超高速の記憶想起や爆発的な相転移の発生を可能にしています。ここでの温度とは統計物理学においてエネルギーの変動や探索の幅広さを表す指標であり、高い温度では探索的に振る舞い、低い温度では特定の状態に急速に収束する傾向があります。つまり、曲がったニューラルネットワークでは記憶の想起が進むことで温度が下がり、それによりさらに速やかな収束が促されるという正のフィードバックが生じ、結果として記憶想起が加速的に進行するのです。

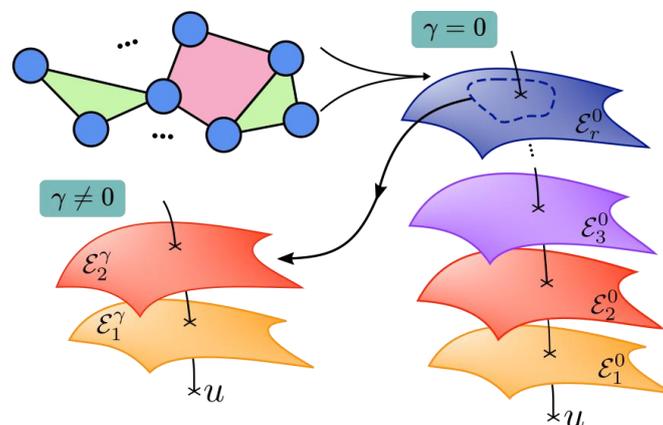


図1 通常モデルの高次相互作用（右）は曲がった空間では（左）コンパクトに表現される。

## 2. 研究手法・成果

研究チームはまず、最大エントロピー原理を Rényi エントロピーに拡張することで、従来の指数型分布ではなく、変形指数分布に従う確率的ニューラルネットワークモデルを構築しました。変形パラメータが正の値のときは正曲率の統計多様体（球面型）上に、負の値のときは負曲率の統計多様体（鞍型）上にニューラルネットワークを構築できます。これにより、従来通りペア相互作用のみを記述した低次数のモデルであっても、曲率（非線形性）を通じて高次相関を内包する構造が自然に立ち現れるようになります。

この枠組みに基づき、研究チームは以下のような多様な理論解析を行いました。

- 平均場解析<sup>7</sup>により、秩序-無秩序相転移やスピングラス相<sup>8</sup>転移が連続的ではなく、急激に変化する“**爆発的相転移**”として現れ、複数記憶が同時安定する領域が生じることを理論的に示しました（図 2a）。
- 動的平均場解析<sup>9</sup>・経路積分法<sup>10</sup>により、温度がネットワーク状態に応じて変化する**自己調節アニーリング機構**が現れ、加速度的に記憶が想起されることを理論的に示しました（図 2b）。
- レプリカ法<sup>11</sup>を用いて記憶容量の定量的な解析を実施し、負の変形パラメータによって記憶容量が増大し、正の変形パラメータによって擬似記憶<sup>12</sup>が抑制される**トレードオフ構造**を発見しました（図 3）。

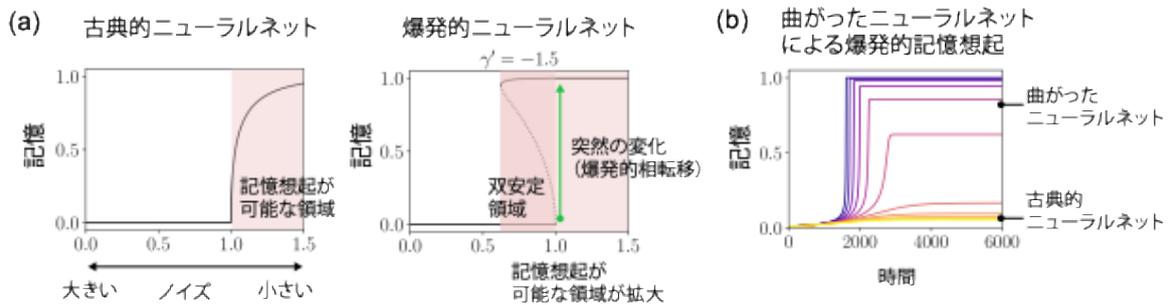


図 2 (a) 古典的ニューラルネットワークの相転移（左）と強い負の曲率で曲がったニューラルネットワークに生じる爆発的相転移および双安定性（右）。(b) 曲がったニューラルネットワークに生じる爆発的記憶想起：自己調節アニーリング機構により加速度的に記憶を想起。

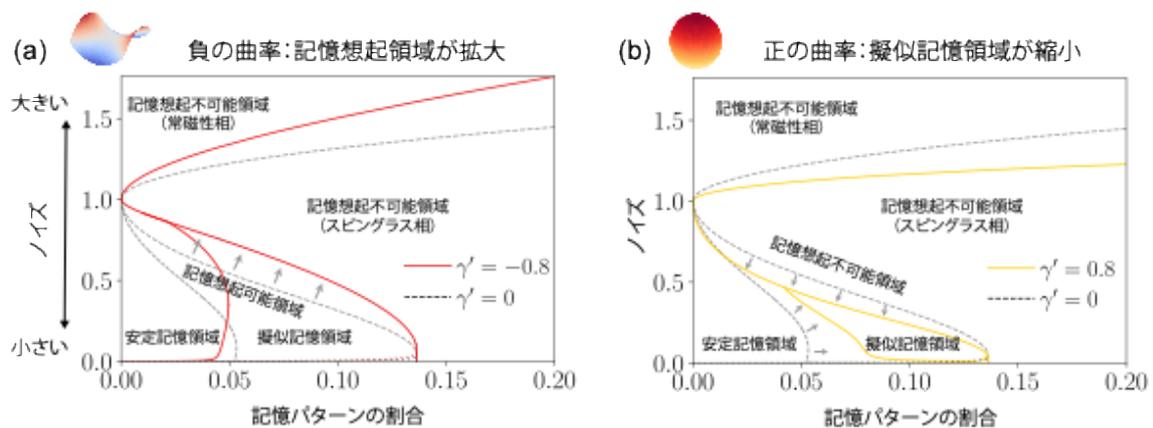


図 3 記憶想起の相図。ネットワークに埋め込む記憶パターンのニューロン数に対する割合（横軸）とシステムに与えるノイズ（縦軸）に応じて安定して記憶想起可能な領域・擬似記憶が混在する領域・記憶想起が不可能な領域が出現する。(a)負の曲率で曲がったニューラルネットワークは記憶可能領域が拡大する。(b)正の曲率で曲がったニューラルネットワークは擬似記憶が混在する領域が縮小し安定記憶領域が拡大する。

また、機械学習で一般的に用いられる視覚画像データセットを用いた数値シミュレーションにより、記憶想起の精度や速度、擬似記憶の混入度が曲率の調整によって変化することが確認されました。これらの結果は、記憶モデルにおける爆発的相転移や多安定性、さらには精度と容量のバランス制御を統一的に理解するための枠組みを与える重要な成果といえます。

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究の曲がったニューラルネットワークの枠組みは記憶検索の高速化と柔軟な制御という点において、既存の連想記憶モデルや深層ニューラルネットワークに新たな理論的基盤を与えるものです。特に温度が状態依存的に自己調節されるというアニーリング機構は、従来の固定スケジュール型アニーリングと異なり、学習や最適化においても高速収束や局所解の回避といった性質を持つ可能性があります。今回発見された自己調節アニーリング機構と類似の現象は、トランスフォーマーモデルの注意機構や拡散モデルなどの最新の機械学習アーキテクチャと構造的に類似する現代的連想記憶モデルにおいても現れることが、本研究によって示されています。これにより、本枠組みの理論的な一般性と拡張性が示されるとともに、今後の AI モデルの設計原理を再考するための基盤となることが期待されます。また、記憶容量とロバスト性のトレードオフ制御が可能であるという特性は、生物の神経回路が状況や環境に応じて適応的に記憶の表現や検索モードを切り替えているという仮説と親和的であり、神経科学的な応用・検証も期待されます。

理論的に整備された高次相互作用モデルであるという特性は、解析手法や性能評価が難しいブラックボックス型 AI に対する説明可能性の付与にもつながります。研究チームは、この枠組みを実装・拡張し、脳の記憶機構の解明や深層学習モデルへの応用につなげ、より柔軟かつ効率的な AI システムを設計するための新たな原理の構築を目指していく予定です。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、以下の科学研究費助成事業の支援を受けて実施されました。

- 科学研究費助成事業 挑戦的研究（萌芽）2024 年度「曲がった統計多様体上のニューラルネットワーク」  
研究代表者：島崎秀昭（課題番号：JP24K21518）
- 科学研究費助成事業 基盤研究（B）2025 年度「樹状突起上の高次統計計算による集団符号化」 研究代表者：島崎秀昭（課題番号：JP25K03085）
- 科学研究費助成事業 特別推進研究（第 2 回 学術変革領域研究(A)）2021 年度「センサスデータ駆動による適応回路の理論構築」 研究代表者：島崎秀昭（課題番号：JP21H05246）

#### <用語解説>

1. **高次相互作用**：3 つ以上の要素が同時に関与する相互作用のこと。神経集団の同期活動や集団的な状態、非線形性の強い現象を説明するうえで不可欠。
2. **最大エントロピー原理**：既知の制約条件を満たす中で最も無作為な（エントロピーが最大の）分布を選ぶ統計的原理。
3. **統計多様体**：確率分布を幾何学的に捉える枠組み。各点が確率分布を表し、距離や曲率といった概念を定義できる空間。
4. **Rényi エントロピー**：シャノンエントロピーを一般化した不確実性の指標であり、データの多様性や確率分布の偏り・広がりを、パラメータを調節して評価することができる。

5. **相転移**：微小なパラメータ変化により系全体の状態が劇的に変わる現象。本研究では記憶状態の急激な変化として観測される。
6. **自己調節アニーリング**：系のエネルギー状態に応じて温度が自動調節される動的なアニーリング手法。従来の固定スケジュール型に比べて柔軟で高速。
7. **平均場解析**：各要素が他要素の平均的な影響を受けると仮定する近似的解析法。大規模系での解析に有効。
8. **スピングラス相**：相互作用が乱雑で多数の安定状態が存在する無秩序な相。神経回路モデルでは、学習されていないパターンが安定状態として現れ、記憶の誤想起や混乱が生じる状態と対応する。
9. **動的平均場解析**：ネットワークの時間発展を平均場近似により記述する手法で、時間依存のダイナミクスを理論的に扱う。
10. **経路積分法**：システムが時間とともにたどるすべての道筋を考慮することで、その全体のふるまいを予測する数理的な手法。複雑な多体系の挙動や集団的な現象の理論的な記述に活用されている。
11. **レプリカ法**：統計力学で平均的な性質を求めるために多数の仮想コピー（レプリカ）を導入して計算を行う理論的手法。
12. **擬似記憶**：学習されていないにも関わらずネットワークが誤って想起してしまう記憶状態。記憶容量が増えすぎると頻出する。

#### <研究者のコメント>



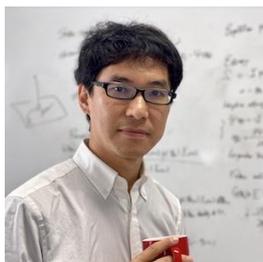
**Aguilera** (バスク応用数学センター) 「本研究が切り開く多様な可能性に私たちは大きな期待を寄せています。生物の神経細胞に見られる高次の統計的特徴を捉える新しいモデリング手法は、脳の仕組みの理解をさらに深めることにつながります。画像や言語の生成 AI に用いられる人工ニューラルアーキテクチャの情報符号化能力の向上にも新たなアプローチをもたらします。本フレームワークは自然知能と人工知能の両分野における情報処理の本質を探る上で、有力な手がかりとなると考えています。」



**Morales** (Araya, Inc) 「この論文は複雑系における高次相互作用 (HOIs) の影響を理解するためのエレガントなアプローチを提示しています。特に印象的なのは、一般化された最大エントロピー原理がモデルパラメータの指数関数的な増加なしに HOIs を効果的に捕えることで、魅力的な現象の研究を可能にしている点です。これにより、爆発的な秩序-無秩序相転移や多安定性を示すシステムを研究できます。これらはハードコードされたものではなく、記憶空間を構築する方法から生じるものです。」



**Rosas** (サセックス大学) 「私は特に、高次相互作用を持つ系から爆発的な相転移を引き起こす基本的メカニズムとして、自己調節型のアニーリングが発見されたことに興奮しています。このメカニズムはよく知られた焼きなまし法に似ていますが、エネルギーと温度の間に独特のフィードバックが存在し、系が自己制御することが特徴です。フィードバックシステムは生命システムの顕著な特徴であり、人工の神経システムにこのような自己制御メカニズムが現れることを、私は特に魅力的だと感じています。」



島崎（京都大学）「曲がった統計的空間でニューラルネットワークを作り、ニューロンの非線形性や高次相互作用を理論的に扱いたい！——そんなシンプルなアイデアから始まった研究は、この発想に共感する仲間たちとの対話を通じて発展し、記憶想起の予想外のふるまいを明らかにしました。予期せぬ展開を仲間たちと追う時間は刺激的でした。本研究は、記憶の高速想起や適応的制御を可能にする枠組みを提示し、AIの新たな設計指針を提案するものと考えています。」

#### <論文タイトルと著者>

タイトル：Explosive neural networks via higher-order interactions in curved statistical manifolds

（曲がった統計多様体上の高次相互作用による爆発的ニューラルネットワーク）

著者：Miguel Aguilera, Pablo A. Morales, Fernando E. Rosas, Hideaki Shimazaki

掲載誌： *Nature Communications* DOI： <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61475-w>