



## 生態系を利用した全く新しい AI

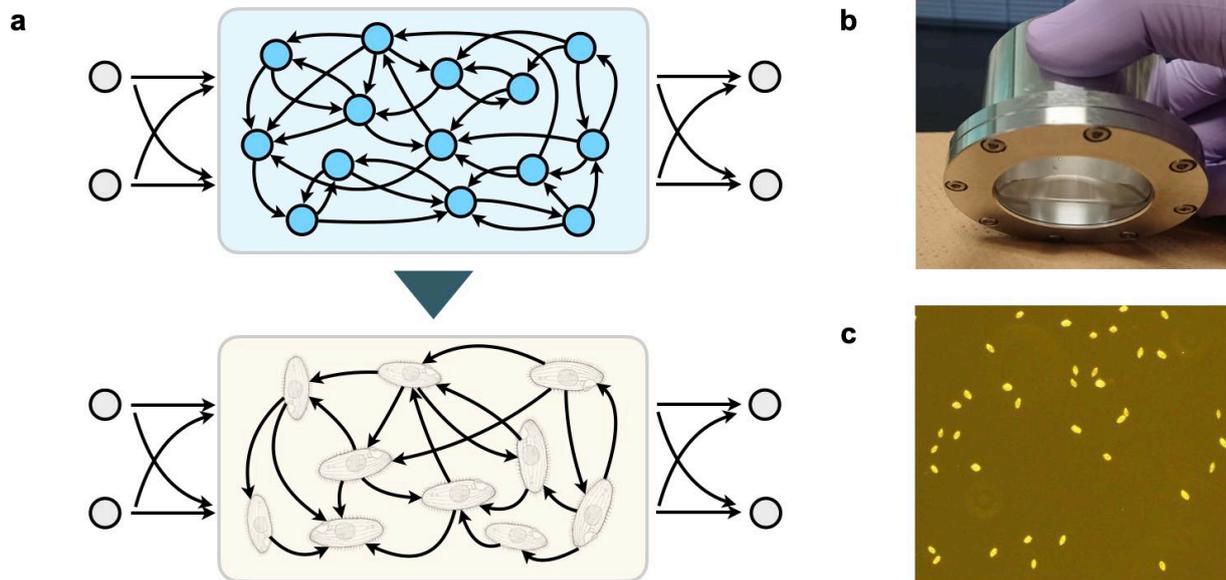
—高い生物多様性は高い計算能力に繋がる？—

### 概要

近年、様々な分野でニューラルネットワークを用いたデータ解析法—いわゆる人工知能（AI）—が盛んに開発・利用されています。これまでに様々なニューラルネットワークが提案され、その計算能力が評価・利用されてきました。しかし、生態系に自然に存在するネットワーク（例えば、食う—食われるといった種間関係）が計算能力を持っているのか、またそれらを我々人間が利用できるのか、については全く研究されてきませんでした。今回、京都大学白眉センター 潮雅之 特定准教授（研究当時、現：香港科技大学助理教授）、B.Creation（株） 渡邊一史 CEO、東北大学 福田康弘 助教、東京大学 徳留勇志 学術支援専門職員（研究当時）、中嶋浩平 准教授 のグループは、生態系シミュレーションと微生物培養系を用いた実験から、生態系に存在するネットワークが計算能力（情報処理能力）を持ち、我々がその能力を利用しうる、という証拠を見つけました。

本研究で示された「生態系の計算能力」は、これまでに注目されなかった計算資源であり、発展著しい AI 技術に新たな方向性を与えるものです。また、高い生物多様性と高い計算能力に関連があることも示唆されており、これまで知られていなかった生物多様性の新たな価値に光を当てるものでもあります。

本成果は 2023 年 4 月 19 日 00 時 01 分（現地時間）に国際学術誌「*Royal Society Open Science*」にオンライン掲載されました。



(a) 研究の概念図。通常のニューラルネットワークを実際の微生物個体群に置き換えて計算を実装。(b) 計算を行ったチャンパー。底面が透明になっており微生物の反応を観察可能。(c) チャンパー内のテトラヒメナの顕微鏡写真。温度・栄養条件に応じて微生物の反応が変わり、この「多様な反応」が計算資源となる。

## 1. 背景

現在、ニューラルネットワーク（注1）を利用したデータ解析法、いわゆる人工知能（AI）は、画像データの分類、言語生成、時系列データ解析など、ありとあらゆる分野で利用されています。ニューラルネットワークの性能は、ネットワークの構造に大きく依存するため、これまでに様々な構造のニューラルネットワークが提案され、その計算能力（入力した情報の変換能力など）が評価されてきました。

一方、「ネットワーク」はAIの分野だけで扱われるものではなく、様々な研究分野で扱われています。生態学においては、食う－食われるといった種間関係などからなる「相互作用ネットワーク」が注目され、ネットワークのサイズ（種数）や相互作用の強さが生態系全体の安定性や近未来の動態に及ぼす影響が長らく研究されてきました。

しかしながら、この生態系のネットワークが、ニューラルネットワークで見られるような計算能力を持つのか、また持つのであれば、我々人間がそれを利用できるのか、といったことについては全く研究されてきませんでした。これは、生態系のネットワークが種間相互作用や種数を厳密に操作することができず、データ解析の目的に応じたネットワークの最適化（注2）が事実上不可能である、ということが一因にありました。

本研究では、ニューラルネットワークの1種である、ネットワークの最適化が必要のないリザーバーコンピューティング（注3）という技術を応用して、生態系のネットワークが持つ計算能力を定量化する枠組みを提示し、さらに微生物培養系を用いて、生物の集団としての反応（個体群動態）を計算資源として利用できることを示しました。

## 2. 研究手法・成果

本研究では最初に、生態系のネットワークを計算に利用できるかどうかを推定するため、コンピュータを用いたシミュレーションを行いました。具体的には、まず長期生物時系列データを元に、状態空間の再構成（注4）という手法を用いてその生物が含まれる系の動態を再現しました。コンピュータ内で再現された系には、その生物に関わる相互作用ネットワークに関する情報が含まれていると考えられます。その系に仮想的なインプットを与えることで、系の仮想的な反応（アウトプット）をシミュレートしました。この仮想生態系への「インプット」と系からの「アウトプット」を対応付け、生態系による情報処理能力を評価したところ、生態系はリザーバーコンピューティングを行うための条件を備えている可能性が明らかになりました。

そこで次に、現実の生態系にも計算能力があることを示すため、真核微生物テトラヒメナ（注5）を用いた培養系を立ち上げました。つまりここでは、生態系の挙動として「微生物個体群動態」を選んだこととなります。この系に「培養液の濃度変化や温度変化」という様々なインプットを与えました。また、テトラヒメナの細胞数を、一定の間隔で静止画を撮影し経時的な変化を見ることのできるタイムラプスカメラによってモニタリングし、「細胞数変化」をアウトプットとしました。シミュレーションで行ったように、インプットとアウトプットの対応を精査すると、驚くべきことに、テトラヒメナの個体群動態にも、リザーバーコンピューティングを行うための条件が備わっていることが明らかになりました。

そこで、野外から得られた魚類の個体数変動の時系列データを培養液の温度変化としてテトラヒメナ個体群にインプットし、テトラヒメナが実際に魚類の個体数変動の近未来予測を行えるかどうか、テストしました。その結果、テトラヒメナ個体群は、線形回帰などのシンプルなデータ解析法よりも高い精度で近未来予測を行うことができました。

これらの成果は、生態系に自然に存在しているネットワークも計算能力を持ちうることを示しています。この事実はこれまで全く顧みられなかったことであり、この研究は「生態系の計算能力」に関する研究の始まりとなる可能性があります。

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究では、異分野の研究者が協働し、全く異なる分野で研究されているリザーコンピューティングと生態系をつなぎました。そこから見えてきた「生態系の計算能力」は今後、様々な新しい疑問や発展の始まりとなりうるものです。例えば、既存のコンピュータを用いたニューラルネットワークの性能を凌駕するようなネットワークが生態系に存在するのでしょうか？また、計算能力は個体群単位だけでなく、生物の個体や群集の単位でも備わっていると考えられますが、これが生物や生態系にとってどのような意味を持つのでしょうか？この計算能力は進化の過程でどのようにして獲得されてきたのでしょうか？これらの疑問に答えていくことで、これまでになかったデータ解析法が開発されたり、これまで理解できなかった生命現象を理解できるようになるかもしれません。

また、従来のリザーコンピューティングでは系を構成する「要素」が多いほど、計算能力が高いことがよく知られています。この「要素」は生態系では「生物種」に対応させることが可能ですが、実際、今回のシミュレーションでも種数が多いほうが計算能力が高い可能性が示唆されています。これは、高い生物多様性と高い計算能力が対応している可能性を示唆しており、生物多様性の新たな価値に光を当てる可能性もあります。

### 4. 研究プロジェクトについて

本プロジェクトは下記の支援を受けて実施しました：京都大学白眉プロジェクト、科研費基盤 B (20H03323)、香港科技大学スタートアップファンド、NEDO(JPNP16007)、JST CREST (JPMJCR2014)、新学術「ソフトロボット学」(JP18H05472)

#### <用語解説>

#### 注1) ニューラルネットワーク

神経の構造を模した人工的なネットワークで、多くのノード（節）をつないだような構造をしている。ノードの数やつなぎ方、または一定数のノードがつながった「層」の数は、データ解析の目的によって様々である。多くのネットワークが提案されているが、入力信号が一方向にしか伝播しないフィードフォワードニューラルネットワークと入力信号がループするリカレントニューラルネットワークの2種類に大別できる。

#### 注2) ネットワークの最適化

ニューラルネットワーク内でどの程度の強度で信号が次のノードに伝わるか、はニューラルネットワークの性能を決める重要な要素である。信号の伝わり方を最適なものにするためのプロセスを「学習」と呼び、誤差逆伝播法と呼ばれる手法が一般に使用されている。通常、学習を行って解析の目的ごとにネットワークを最適化するが、このプロセスには大きな計算コスト（時間や電力など）がかかる。

#### 注3) リザーコンピューティング

通常のニューラルネットワークと異なり、一定のルールのもとで信号の伝わり方を決定した後、信号の伝え方の最適化を行わない方法。学習をほとんど行わないため、他のニューラルネットワークでは必要となる計算コストがかからない。

#### 注4) 状態空間の再構成

時系列データを元に、その時系列データが属する系の動態を再現する手法。本研究では、時間遅れ埋め込みという手法に基づいた状態空間の再構成を行った。

## 注5) テトラヒメナ

単細胞の真核モデル生物。ゾウリムシなどと同じ繊毛虫に属する。細胞サイズが約 30–100  $\mu\text{m}$  で、最適条件下での倍化時間は約 2 時間。細菌を捕食するが、無生物培地でも容易に培養できる。

### <研究者のコメント>

これまで、生態系動態の理解や種間相互作用ネットワークの推定といった生態学の研究を行ってきましたが、その過程で感じていた「生態系に対するもやもや感」が何だったのか、この研究を通して一つ理解できました。生態系は巨大な情報処理装置だったのです！恐らくあらゆる生態系で、膨大な情報が超高速かつ省エネルギーで飛び回っているはず。びっくりです。(潮雅之)

### <論文タイトルと著者>

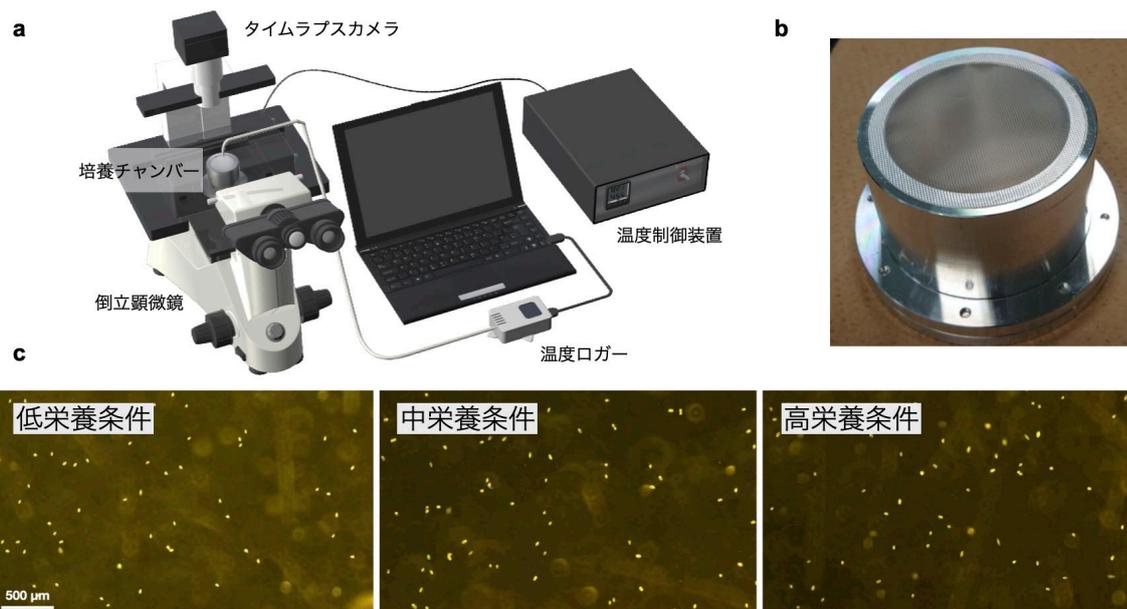
タイトル：Computational capability of ecological dynamics (生態系動態の計算能力)

著者：Masayuki Ushio, Kazufumi Watanabe, Yasuhiro Fukuda, Yuji Tokudome, Kohei Nakajima

掲載誌：Royal Society Open Science DOI： <https://doi.org/10.1098/rsos.221614>

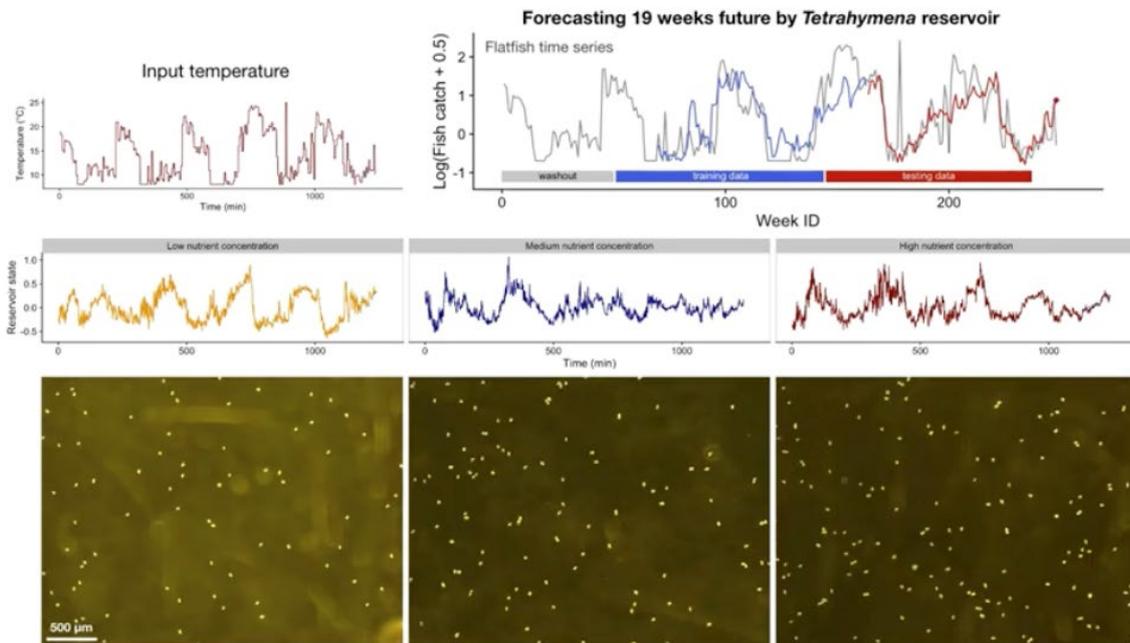
### <参考図表>

- ・立ち上げたテトラヒメナ培養装置



微生物による計算が可能であることを示した実験装置。(a) 倒立顕微鏡・タイムラプスカメラと培養液の温度制御装置。培養液の温度を変化させて、微生物の反応をカメラで連続的に記録する。(b) テトラヒメナ培養チャンバー。(c) 様々な栄養条件下でのテトラヒメナの様子。

・参考動画



実際に計算を行っているテトラヒメナ個体群の動画を以下で閲覧可能（CC-BY）。

[https://youtu.be/z\\_QeEka4W3w](https://youtu.be/z_QeEka4W3w)

<https://youtu.be/SUmkYAnfjFk>