

非対称な多重ネットワークにおける協力進化の新しいケースを発見

協力行動の進化のメカニズムについて、個体間の競争（相互作用）と学習（戦略更新）の範囲の非対称性を多重ネットワークで表現し、多様なシナリオをシミュレーションで検証しました。その結果、従来の研究とは逆の、非対称性が協力行動を促進しうる新しいケースを明らかにしました。

協力行動は、私たちの社会の基盤を形成する要素の一つです。しかし、その進化のメカニズムは、まだ完全には解明されていません。近年、人間の社会的なつながりの特徴を捉えるモデルとして「多重ネットワーク」が注目されており、先行研究では、協力進化の2つの主要なプロセス、「競争（相互作用）」と「学習（戦略更新）」が、同じパートナーと行われる、すなわち、対称的である場合ほど、協力の進化が促進されることが示されています。

本研究では、多重ネットワークを用いて、協力行動が集団に広まっていく仕組みを分析しました。相互作用の相手選びの範囲と戦略更新の相手選びの範囲に関する対称性に焦点を当て、多様なシナリオをマルチエージェントシミュレーションで検証しました。その結果、これまでの研究とは逆の、非対称性が協力の進化を促進する新しいケースが存在することを明らかにしました。

この発見は、あるグループ内で協力行動を広めようとする場合、競争と学習を異なるパートナーと行う非対称的なアプローチが効果的なケースもあり得ることを示唆しています。今後、本研究結果を、人類学・経済学・社会心理学など社会科学分野の研究と結びつけ、協力の進化に関する研究が更に深められ展開していくことが期待されます。

研究代表者

筑波大学システム情報系

秋山 英三 教授

稲葉 理晃（理工情報生命学術院システム情報工学研究群 博士後期課程）

研究の背景

生物の協力行動の進化とその背後にあるメカニズムは、多くの研究者が長年にわたり探求してきたテーマです。私たちの社会やコミュニティ、さらには生態系におけるさまざまな生物の行動において、協力は中心的な役割を果たしています。しかし、個体が自己の利益を度外視して協力行動をとる理由や、どのようにして協力が持続するのかという問いに対する答えは、まだ完全には解明されていません。

これまでの研究では、個体間の関係を多重ネットワーク^{注1)}で表現し、そのネットワーク上での協力の進化を理解するために、多くのアプローチが試みられてきました。私たちの日常生活においても、情報のやりとりやコミュニケーションのネットワークは非対称（つながり方が異なる）であり、それぞれの個体が異なる方法で情報を共有し、学習しています（参考図）。この多重ネットワークの非対称性が協力の進化にどのように影響を与えるのかを理解することは、協力行動の進化の研究に新しい視点を開くと考えられます。

研究内容と成果

本研究では、協力行動の進化における、相互作用と戦略更新（適応度の低い戦略から高い戦略への置き換え・学習）のネットワークが非対称であることの影響を、詳細に検討しました。エージェント（個体）が相互作用と戦略更新を行う範囲、ネットワーク構造、相互作用ルール、戦略更新ルールの各要素を網羅的に組み合わせることで、多様なシナリオを作成し、それぞれの要素がどのように協力行動の進化に影響を与えるのかを、マルチエージェントシミュレーション^{注2)}を通して明らかにしました。

従来の研究では、多重ネットワーク上での相互作用と戦略更新が対称である場合に、協力行動が進化しやすい（集団内に広まりやすい）とされてきました。しかし、本論文では、これまでに言及されることのなかった、相互作用と戦略更新の非対称性が協力行動を促進する2つのケースを発見しました。

具体的には、1つ目のケースでは、スケールフリーネットワーク^{注3)}上での公共財ゲーム^{注4)}において、相互作用の範囲が狭い場合、戦略更新の範囲を中程度の範囲から広げていくことにより、協力行動が進化する可能性が高まることが示されました。2つ目のケースでは、スケールフリーネットワークを含むさまざまなネットワーク上での囚人のジレンマゲーム^{注4)}において、ネットワーク上で直接隣り合った相手からだけ学習し、相互作用の範囲が2ホップ（隣の隣まで）である場合のみ、協力率が急激に増加することが示されました。

今後の展開

本研究で明らかになった、非対称性が協力行動にもたらす影響は、多重ネットワーク上での協力行動の進化の研究に新しい視点を提供しています。この知見は、将来的には、人類学・経済学・社会心理学など、他の社会科学における協力と競争のダイナミクスに関する理解を、一層深める手がかりとなることが期待されます。

参考図

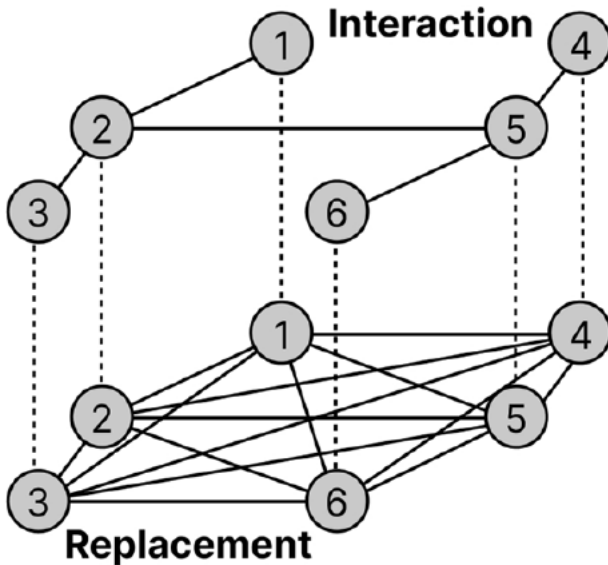


図 ネットワークの非対称性の概念図。1～6の丸は個体を表しており、各個体間をつなぐ線はコミュニケーションが発生する可能性を表している。コミュニケーションの種類に応じて層が存在する。この図の例では、コミュニケーションには、相互作用（Interaction）と戦略更新（Replacement）の2種類があり、相互作用は狭い範囲に限定されるのに対し、戦略更新はより広い範囲が対象となっている。層間で個体と同じつながり方をしていることを対称的、異なることを非対称的と呼ぶ。

用語解説

注1) 多重ネットワーク（multiplex network）

複数の層から成るネットワーク。各層を構成するノードセットは共通だが、ノード間のつながり方は層ごとに異なる。人間社会において、コミュニケーションの種類によって、各個人が異なる人間関係を形成するさまを表現するのに有用である。

注2) マルチエージェントシミュレーション

生物や人間などを、比較的単純なルールに則って動く行動主体（エージェント）とみなし、複数のエージェントが相互作用を繰り返すことによって、全体として生じる複雑な現象を分析するための手法。伝統的な解析的手法では分析が困難な、複雑なシステムや社会現象のシミュレーションに用いる。

注3) スケールフリーネットワーク（scale-free network）

ネットワーク内のノードが持つリンク数の分布がべき乗則に従う特徴を持つネットワーク構造。極少数の特定のノードが非常に多くのリンクを持ち、残りの大多数のノードは少数のリンクしか持たない、という不均等なつながり方をするネットワークである。このような性質は、インターネット、論文の引用ネットワーク、SNS上の友人関係ネットワークといった多くの実世界のネットワークで観察され、その構造がさまざまな現象やプロセスに影響を与えることが知られている。

注4) 公共財ゲーム・囚人のジレンマゲーム

集団全体の利益を最大化するには協力した方が合理的だが、自分のことだけを考えると協力しない方が合理的というジレンマ状況を表すモデルのうち、集団が2人である場合を囚人のジレンマゲーム、2人以上に拡張したものを（最もシンプルな形態の）公共財ゲームという。

研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト（21H01568A）の一環として実施されました。

掲載論文

【題名】 Evolution of cooperation in multiplex networks through asymmetry between interaction and replacement

(相互作用と戦略更新の非対称性による多重ネットワークにおける協力の進化)

【著者名】 Masaaki Inaba¹, Eizo Akiyama²

¹Graduate School of Science and Technology, Degree Programs in Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan

²Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan

【掲載誌】 *Scientific Reports*

【掲載日】 2023年6月17日

【DOI】 10.1038/s41598-023-37074-4

問い合わせ先

【研究に関すること】

秋山 英三 (あきやま えいぞう)

筑波大学 システム情報系 教授

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000000823>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp