

# 進化ゲームに基づくオンラインユーザ間協力機構の解明

代表研究者	一ノ瀬 元喜	静岡大学工学部・助教
共同研究者	佐山 弘樹	ビンガムトン大学システム科学・産業工学部・准教授
共同研究者	高野 雅典	サイバーエージェント・データマイニングエンジニア

## 1 はじめに

協力行動は社会性の構築・維持に大きく寄与するが、基本的に協力はコストを負って他人に利益を与える行動のため、進化するのは難しい。これまでに協力進化のための様々な理論が提唱されてきた<sup>1</sup>。しかし、インターネットでつながった大規模な人間集団の協力行動に関する研究は発展途上である。そこで、インターネット上のオンラインユーザ間の協力を促進・維持する仕組みの解明が求められている。例えばネットオークションなどにおいては相手が信頼できるかどうか判断するために第三者によって与えられたユーザのこれまでの取引の評価を基にすることは多い。またグルメサイト、ホテル予約、商品のレビューなど、ユーザの口コミが対象の良し悪しを決めるために使われることが多く、それらの情報の重要性は極めて高い。一方、ソーシャルネットワークサービス上で提供され、ブラウザを用いてプレーするソーシャルゲームにおいてユーザ同士が協力して設定された目的を達成するシステムがゲームに組み込まれていることがあり、ゲームの面白さを向上させるのに役立っている。このようにオンラインユーザ間の信頼・協力は製品の優劣を左右する重要な要素として考えられている。

しかし、どのようなシステムあるいはルールを入れれば、オンラインユーザ間の信頼・協力が達成されるかについて理論的根拠を基に設計されたものは少ない。進化ゲーム<sup>2</sup>は、プレーヤが複数の戦略を取りうる時、どの戦略を取ることが結果的に有利になるかということ、戦略の割合の時間変化を分析することで明らかにするための理論体系であり、組織における施策・ルールの設計や自律的ロボットの分散制御など工学的にも応用されている。本研究では、ビッグデータとして蓄積されているオンラインユーザ間の協力行動の分析やシミュレーションモデルにより、ユーザ間の信頼・協力をより促進させるような機構を明らかにし、システム的设计やルール作りに貢献することを目的とする。

## 2 ソーシャルゲームによる実データ分析

ソーシャルゲームとはソーシャルネットワークサービス (SNS) 上で提供され、ブラウザを用いてプレーするゲームであり、SNS の普及に伴って利用者も急激に増大している。ソーシャルゲームの中でユーザ同士が協力して設定された目的を達成するシステムがゲームに組み込まれていることがあり、これはゲームの面白さの向上に貢献している。共同研究者の高野はサイバーエージェントが提供するガールフレンド (仮) というゲーム上で展開されたイベント「たすけて! マイヒーロー お花見編」においてユーザ同士の協力の様子について実データを用いて分析した。このゲームではレイドイベントというものが発生する。このイベントでは同じグループ (ギルドと呼ばれる) のユーザ同士が協力してボスを倒すと、ある状況では稼げるポイントが多くなる。しかし、自分はボスに対して攻撃せずに仲間が協力してボスに攻撃してくれる方が自分は最も都合がよい状況となるため、そのような状況においてもユーザ間に協力行動が見られるかを分析した。

分析において「協力行動」は単純には、ポイント上効率は悪いにも関わらずボスを倒すために最後に攻撃したものとして定義した。この定義を用いて協力行動の割合を密度分布を分析したところ、協力度が0のユーザが多い一方で、協力的なユーザもある程度存在していることが分かった (図1)。また各グループ (ギルド) 毎の協力者の割合も非協力者のグループが多い一方で協力者と非協力者が混在したグループが存在した。協力行動は協力的なグループと非協力的なグループに分かれていないと長期的には存続できないことが知られており、現実のグループでもこのような偏りができることは興味深い。このようなグループ間の偏りはどのようにしてできるのだろうか。図2はグループからの離脱率を示しており、非協力的グループから抜け出す非協力者の率が最も高く、ついで協力的グループから抜け出す協力者、最も離脱率が低いのが協力的グループから抜け出す非協力者となっている。これにより、グループ間の偏りが保たれていると考えられる。またこの離脱率は非協力者が多いグループからは多くの個体が移動して去ることで協力行動が進化するという理論的知見とも一致している<sup>3-5</sup>。

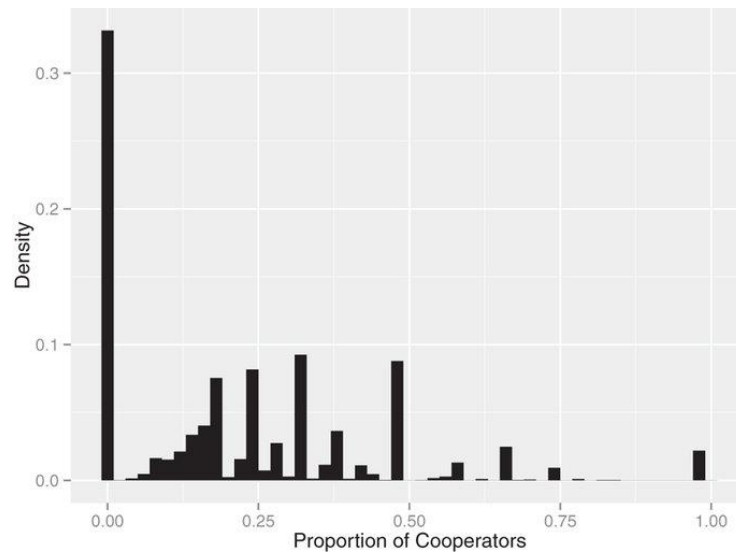


図1 協力度の密度分布

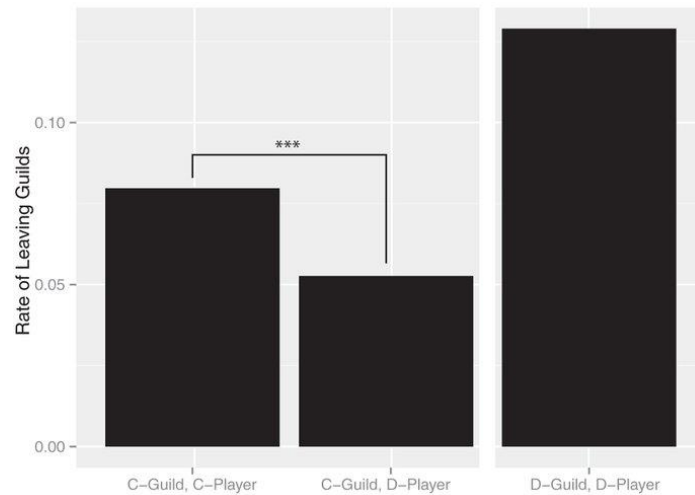


図2 グループからの離脱率

協力的グループに属するユーザは非協力的グループのユーザよりもイベントで多くのポイントを稼いでいるはずである。イベントでの協力的グループと非協力的グループにおけるユーザが獲得したポイント効率を図3に示す。協力的グループに属するユーザの方が非協力的グループのユーザよりも平均して多くのポイントを獲得していることが分かった。一方で、協力者と非協力者の獲得ポイントはどうなっているだろうか。協力行動の定義はコストを負って他個体に利益を与える行動であり、一方で非協力行動はコストを伴わずにその利益を享受するだけであるため、非協力行動の方が有利なはずである。図4は非協力的グループの非協力者、協力グループの非協力者と協力者のポイントを示したものである。これによると協力的グループの協力者のポイントは非協力者よりも多く、理論的知見と矛盾しているように見える。これは協力者がグループ間でうまく別の協力者を選んでグループを組み、相互作用しているからかもしれない。

以上のように、研究の結果、ソーシャルゲームのユーザ同士が協力する場面において、協力しやすいグループ、非協力的（自分勝手な行動をとる）なグループなど多様な構成をとることが分かり、実際に協力的なグループでは多くの得点を獲得していることも分かった。

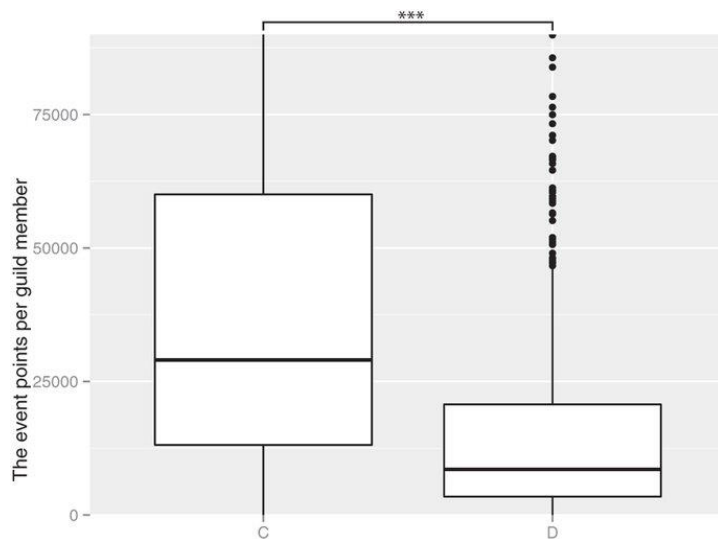


図3 協力的グループと非協力的グループにおけるユーザが獲得したポイント効率

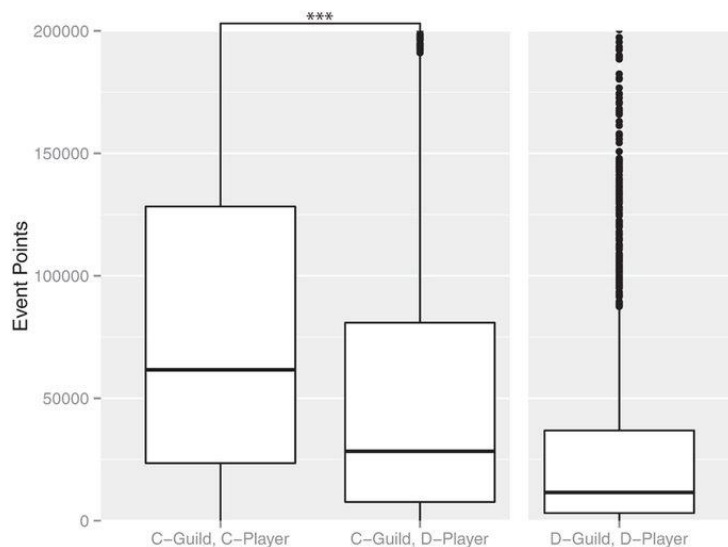


図4 協力者、非協力者が協力的グループ、非協力的グループにおいて獲得したポイント効率

### 3 社会ネットワーク上の協力の進化

協力的行動はコストを負って他個体に利益を与えるという定義により繰り返しがなく個体同士がランダムに相互作用する状況においては進化できない<sup>6</sup>。一方で、集団構造がある状況では協力は進化することが知られている<sup>1</sup>。なぜなら協力はグループになると強く、局所的なグループを作ることによって、非協力的個体よりも利益を得ることができるからである。特に実際の社会ネットワークの特徴を再現しているとされるスケールフリーネットワーク（多くのノードが少数のノードとつながっているのに対して、少数ではあるがハブと呼ばれる多くのノードとつながっているノードが存在するネットワーク）では協力的行動が強力に促進される<sup>7</sup>。スケールフリーネットワークでのゲームでは利得が積算されるようになっていることが多いが、この設定により、どこかに存在する協力的のクラスターが一旦ネットワーク上のハブを占拠するとその個体の利得はまわりに比べてかなり高くなるため協力的行動の戦略がネットワーク上に広がることになる。オンラインユーザ

間のつながりはネットワークで表現できるため、このような社会ネットワーク上で協力行動がどのようにして広まるかがわかれば実際のユーザ間の協力を促す仕組みも浮き彫りになると考えられる。

この社会ネットワーク上で協力が進化することは2つの前提に成り立っている。最初からある程度の協力者が存在すること、利得が積算されることである。もしこの2つの前提がなければ協力行動は広まらないかもしれない。そこでここではそのような前提を用いる。初期状態で、協力戦略は全く0から始め、突然変異のみで協力が出てくる。また利得は積算と同様に平均の場合も考える。このような状況でも協力は広まるか、広まるとすれば、それがどのようにして広まるかを各ノードの状態変化を詳細に分析することで調べる。

ネットワークとして現実の社会ネットワークの特徴を一部反映するスケールフリーネットワークを用いる<sup>8</sup>。ネットワークは $N$ 個のノードで構成され、初期状態では全てのノードが非協力者の状態からスタートする。ランダムにノードを1つ選ぶ。対象ノードは自身の近傍ノードと囚人のジレンマゲームを行い、利得を得る（利得は積算利得と平均利得の2つの場合を考える）。この時、近傍も同様にゲームを行う。対象ノードは近傍からランダムにノードを1つ選び、そのノードの利得が対象ノードより高ければある確率で近傍ノードの戦略を模倣する。その後、突然変異として、全ノードからランダムにノードを1つ選び、そのノードの戦略を反転（協力者なら非協力者に、非協力者なら協力者に）させる。初期状態では全て非協力者から始まるので、最初のうちは協力者はこの突然変異のみによって生じることになる。このステップを数十万回繰り返す。

非協力を選んだ時の有利さ（これを裏切りへの誘惑と呼ぶ）を変えて最終的な協力者の割合を示したものを図5に示す。積算利得の平均次数を変えたものを赤線で示し、平均利得の平均次数を変えたものを青線で示す。基本的に協力行動は、平均利得の場合より積算利得の場合に促進されている。これはハブ（他に比べて著しく次数が大きいノード）を協力者が占有し、その周りも協力者になっている状態だと、そのハブが他のノードから利得を多く得ることができ、協力戦略がまわりに広がるためである。しかし、これは裏切りへの誘惑が高すぎると協力が不利になるので起こらない。積算利得の場合、平均次数が大きくなると協力が抑制されることも分かった。これは、平均次数が低いほうが非協力につながっている可能性が低く、協力のクラスタを作りやすいためであると考えられる。その一方で、平均利得の場合には、積算利得の場合とは反対に平均次数が高くなるほど協力が促進されることが分かった。これは平均次数が高いと、レアに存在する協力のクラスタが他の協力者につながりやすいからであると考えられる。これにより協力が生き残る確率が高くなると考えられる。しかし、これは協力が少ない初期段階で飲み起こると考えられる。一旦、協力が広がってしまうと、非協力者は平均次数が高い場合はより多くの協力者を搾取できるからである。

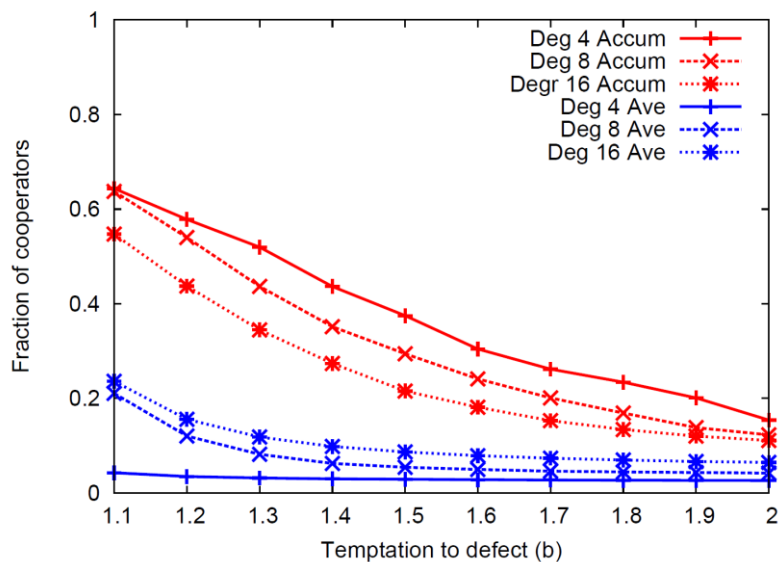


図5 裏切りへの誘惑に対する最終的な協力の割合（赤：積算利得，青：平均利得）

協力者がネットワークに徐々に広がっている場合にどのようなことが起こっているかミクロな状態に注目して分析する。図6は最初の数百世代においてどの次数からどの次数に戦略の更新が起こったかの頻度を示している。平均利得の場合、低い次数のノードのみが高い次数のノードの戦略の変更を可能にしていることが分かる。その結果、この場合は協力は次数が低いノードからより頻繁に広がっていくことが分かった。一方で積算利得の場合には、比較的広い範囲の時数のノードが戦略の変更に参加していることが分かった。さらに今度はどのような局所的な環境が戦略を広げているかを分析する。図7は戦略を広げたノードの次数とその近傍の状態（近傍の協力者の割合）をあらわしたものである。積算利得の場合は前の分析と同様に比較的どのような次数のノードでも近傍の戦略を変更させていることが分かる。さらに周りの協力者の割合が高くなるほど、近傍の戦略を変更させる回数は多くなっている。これは周りに協力が多くそのノード自身の得点が高くなるためであると考えられる。一方で、平均利得の場合には近傍の協力者の割合に関係なく低い次数のノードのみが近傍の戦略を変更しやすい傾向にある。これは次数が大きくて協力の割合が高いノードは非協力者によって容易に搾取されてしまうからであり、協力者から非協力者への戦略変更が起きにくいためであると考えられる。

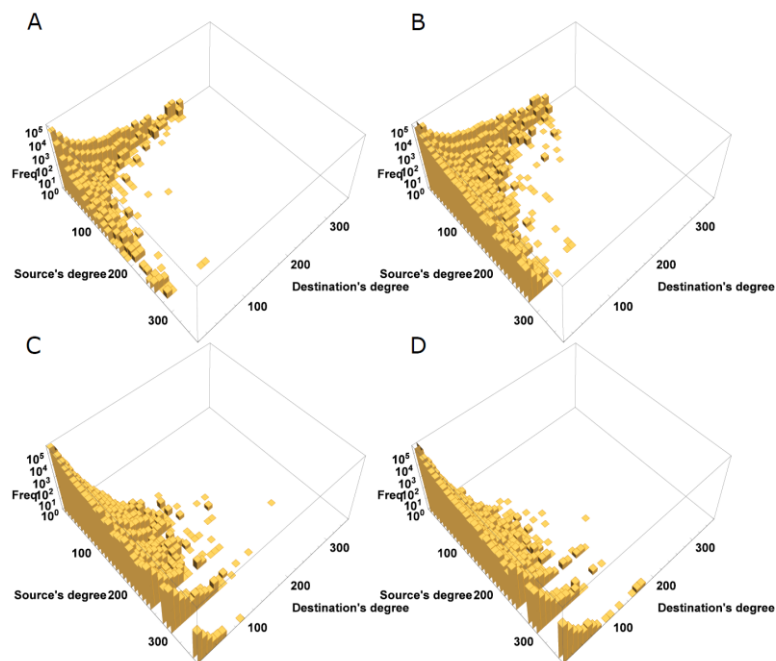


図6 戦略変更元次数と戦略変更先次数に対する戦略更新が起こった頻度

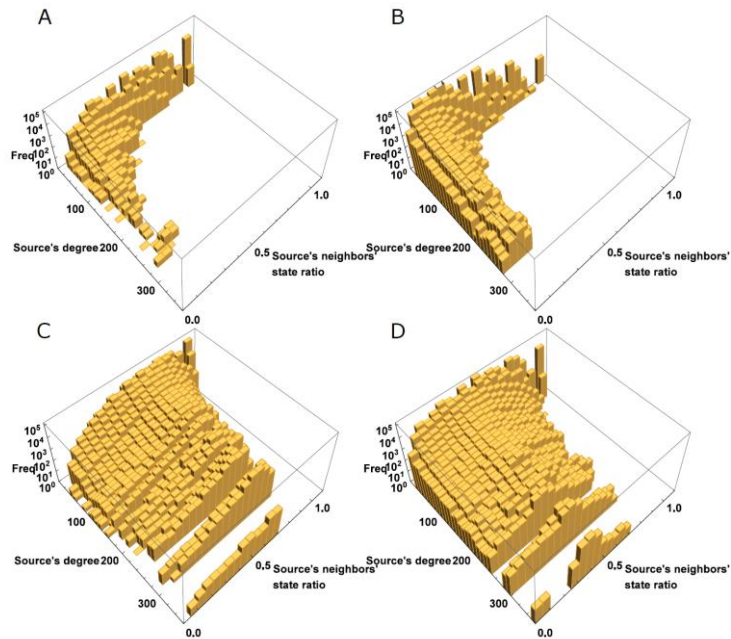


図 7 戦略変更元次数とその近傍の協力率に対する戦略更新が起きた頻度

現実のネットワーク上でもこのような傾向が見られるか実際のデータを使って検証することが今後の課題である。具体的には、SNSなどで友達を持つことが有利に働く場合には、協力する傾向が強まると考えられる。一方で、友達を持つことに時間や金銭的なコストがかかる場合には協力行動は広まりにくくなるはずである。これらを国立情報学研究所が提供する企業のデータセットの分析や Amazon Mechanical Turk を用いた実証実験などによって検証する。このようにしてオンラインユーザ間が協力しやすくなる仕組みを発見し、制度設計構築などに貢献する。

### 【参考文献】

- [1] M. A. Nowak. Five rules for the evolution of cooperation. *Science*, 314: 1560-1563, 2006.
- [2] J. Maynard-Smith. *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- [3] J. W. Pepper and B. B. Smuts. A mechanism for the evolution of altruism among nonkin: positive assortment through environmental feedback. *The American Naturalist*, 160: 205-213, 2002.
- [4] J. W. Pepper. Simple models of assortment through environmental feedback. *Artificial Life*, 13: 1-9, 2007.
- [5] G. Ichinose and T. Arita. The role of migration and founder effect for the evolution of cooperation in a multilevel selection context. *Ecological Modelling*, 210: 221-230, 2008.
- [6] M. A. Nowak. *Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life*, Harvard University Press, 2006.
- [7] F. C. Santos and J. M. Pacheco. Scale-free networks provide a unifying framework for the emergence of cooperation. *Phys Rev Lett*, 95: 098104, 2005.
- [8] A. Barabasi and R. Albert. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286: 509-512, 1999.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Invasion of cooperation in scale-free networks: Accumulated vs. average payoffs	NetSci 2014	2014.6
Invasion of cooperation in scale-free networks: Accumulated vs. average payoffs	Proceedings of Artificial Life 14, 398-399	2014.8
Environmentally driven migration in a social network game	Scientific Reports, 5, 12481	2015.7