

他者間仲介行動と協力行動の共進化

小島 拓郎[†] 鈴木 麗璽[†] 有田 隆也[†]
[†]名古屋大学 大学院情報科学研究科

1 はじめに

協力行動の進化は進化生物学における重大な問題の一つであり、多くの研究がなされてきた [1]. ネットワークの構造が協力行動の創発に影響することが知られており、さらに関連してネットワーク構造と協力行動の共進化に着目した研究が盛んにおこなわれているが [2], 主に自己-他者間関係の変更が焦点が当てられている. しかし、一方で、人間の社会ネットワークにおいては直接影響する当事者以外の第三者による関係の調整, すなわち他者-他者間関係に第三者が介入し影響を与える行為が広くなされるが, そのような行為に注目した研究は行われてこなかった.

本研究では, このような行為を仲介行動と呼び, それが協力行動の創発に及ぼす影響について知見を得るために, ネットワーク上の協力行動の進化に仲介行動の進化を導入し, 実験を行った.

2 モデル

ネットワーク上の各ノードに配置された個体は囚人のジレンマゲーム (PDG) の戦略 g_{pd} と仲介戦略 g_{md} を持つ. g_{pd} は 1 (協力) または 0 (裏切り) のいずれかの値をとり, リンクでつながった近隣の個体と PDG を行う. g_{md} は閾値 $threshold$ (0 から 1 の実数), 仲介行動の数 act_0, act_1 (0 以上 ACT_MAX 以下の整数) から成る. 表 1 は PDG の利得表であるが, σ は相互作用自体のコストである.

表 1: PDG の利得表

	協力	裏切り
協力	$R - \sigma$	$S - \sigma$
裏切り	$T - \sigma$	$P - \sigma$

ただし, $T > R > P > S$

各個体は近隣個体中の協力個体の割合が閾値より小さい場合は act_0 , 大きい場合は act_1 の数のペアだけ, 近隣個体から異なる組み合わせでランダムに選び, 仲介を行い, 仲介された 2 個体は PDG を行う. 仲介時に選ばれた 2 個体が互いに隣接しており既に PDG を行っている場合でも仲介された 2 個体は PDG を行う.

以上の 2 段階の PDG で得られる利得の合計を個体の適応度とする. 各個体は近隣および自個体のうち, 最も高い適応度を持つ個体の戦略 (g_{pd} と g_{md}) を次のステップで使用する. この時各戦略要素について一定の突然変異率 p_m の確率で突然変異が発生し, g_{pd} は反転, また $threshold$ および act_0, act_1 は一様乱数で作成された新たな値を代入する.

以上で説明した操作を (1) 近隣個体と PDG, (2) 仲介を行い, 仲介された個体同士で PDG, (3) 戦略を次ステップへ継承, 突然変異, の順序で行い, これを 1 ステップとして繰り返し行う.

3 実験

ネットワークとして $W \times W$ のトーラス二次元 Moore 近傍ネットワークおよび, 二次元 Moore 近傍から次数を変更しないように辺を入れ替えたものを使用した. ランダムに二辺を選び, この二辺が互いのノードを片側ずつ入れ替え, 次数を保ったままランダムなグラフを作成した. この時, 全ての辺のうち, 入れ替え操作を行う辺の割合を p_n とする. 本実験では, Moore 近傍の格子状ネットワーク ($p_n = 0$) および全ての辺の内半数の辺について上記の操作でランダムに入れ変えたネットワーク ($p_n = 0.5$) の 2 つの設定を用いた. また, 個体数 $N = 2500$, 格子状平面の幅 $W = 50$, 突然変異率 $p_m = 0.001$ とした. また, PDG の利得として, $T = 1.55, R = 1.0, P = S = 0, \sigma = 0.5$ を用いた.

$p_n = 0$ および $p_n = 0.5$ のそれぞれのネットワークについて仲介行動の最大回数 ACT_MAX を変化させて実験を行った. なお, 本モデルにおいてはノードの次数は全て等しく d とし, ACT_MAX の値は $d(d-1)/2$ 以下とする. ACT_MAX はその社会における仲介行動のしやすさを意味しており, これが大きいほど制限が弱く仲介行動しやすい. $ACT_MAX = 0$ の時は, 仲介行動の無しのモデルとなる.

それぞれの設定において 10 回試行を繰り返し, 1000 世代の協力者の割合の平均を図 1 に示す. なお, $p_n = 0.5$ においては各試行ごとにそれぞれ異なるネットワークを作成した. 局所性のある格子状のネットワーク ($p_n = 0$) では協力が広まりやすいが, ランダムなネットワーク ($p_n = 0.5$) では広まりにくいことが確認された. また, 平均すると仲介がある場合は無い場合に比べて協力者の割合が多かった.

仲介行動を行わない ($ACT_MAX = 0$) 時 (協力者の割合は $p_n = 0$ でおよそ 0.65 および $p_n = 0.5$ でおよそ 0.15) と比較すると, いずれの p_n の設定においても $ACT_MAX = 1$ の時には協力がやや少なくな (およそ 0.61 およびおよそ 0.09), $p_n = 0$ では $ACT_MAX = 15$ (0.90) 程度まで増加傾向でその後は横ばい傾向, $p_n = 0.5$ では $ACT_MAX = 8$ (0.29) 程度まで増加傾向でその後は平均値が大きく振動しながらやや減少傾向となった. また, ACT_MAX の増加にともなって試行ごとの値のバラつきも大きくなっており, 特に, $p_n = 0.5$ のネットワークでは協力者がほとんど存在しない集団になることもあれば協力が強く促進されることもあり, 試行ごとに不安定な結果となった. ACT_MAX が大きくなるにつれて仲介戦略が集団に与える影響も大きくなり, その結果協力者の割合も極端化したのだと解釈で

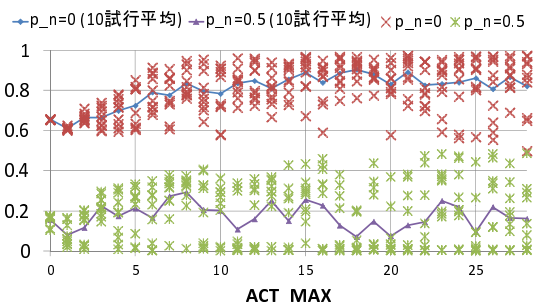


図 1: 協力者の割合 (全世代の平均およびその 10 試行での平均)

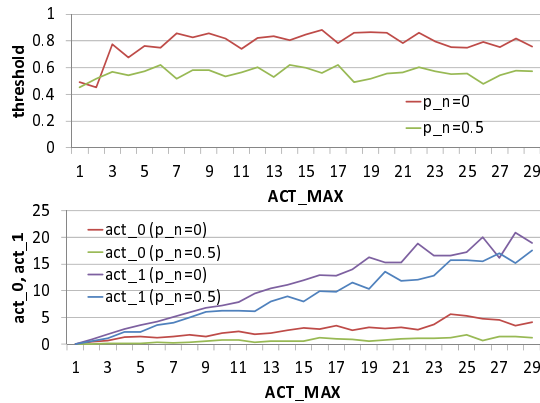


図 2: g_{md} の各要素 (全世代の平均およびその 10 試行での平均)

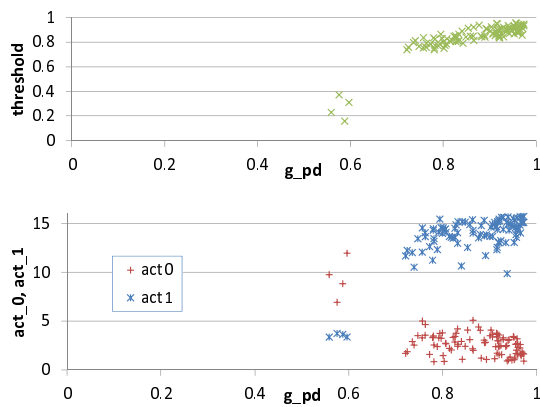


図 3: 各試行の g_{pd} と g_{md} の平均 ($p_n = 0$)

きる。 $p_n = 0.5$ の場合には平均してあまり協力が促進されなかったが、このようなネットワークの下ではそもそも安定的な協力関係が築きにくく、これが仲介戦略によってさらに不安定になってしまうため、集団全体が裏切り合いになりやすいためであると考えられる。したがって、仲介戦略が協力を促進するには協力者がある程度以上の割合で安定的に存在する必要があるのだと考えられる。

図 2 に各 ACT_MAX における仲介戦略の傾向を示す。仲介戦略は、全体として act_0 が小さく act_1 が大きい傾向にあり、近隣に裏切り者が多ければ仲介は多く行わず、逆に協力者が多ければ仲介を多く行う戦略となった。いずれの値も ACT_MAX の増加にしたがって増える傾向にあり、 $p_n = 0$ の時より $p_n = 0.5$ の時のほうが小さかった。 $threshold$ の値は $p_n = 0$ において ACT_MAX が小さい時には例外的に小さい値だが、それ以外では横ばいで、平均すると $p_n = 0$ は 0.78 程度、 $p_n = 0.5$ では 0.56 程度となった。

協力が促進された場合と裏切りが広まった場合で仲介戦略に大きな違いがあり、また $p_n = 0$ の時と $p_n = 0.5$ の時とでも傾向に違いが見られた。この違いについて論じるため、ACT_MAX = 16 で 100 回試行を行い、各試行でのゲーム戦略 g_{pd} と仲介戦略 g_{md} のそれぞれの要素の平均を図 3 および図 4 に示す。

まず $p_n = 0$ の時は、協力が広まる場合 (図 3 中 g_{pd} 平均が 0.7 より大きいとき)、あまり広まらない場合 (同じく 0.7 より小さいとき) があつた。協力が広まる場合は $threshold$ は高く act_0 が大きく act_1 が小さい仲介戦略、すなわち近隣の協力者の数が多いときのみ仲介する戦略となった。協力が広まらない場合には

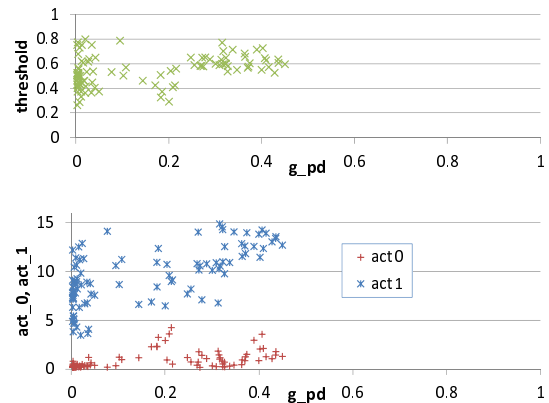


図 4: 各試行の g_{pd} と g_{md} の平均 ($p_n = 0.5$)

$threshold$ は小さく、 act_0, act_1 の値から周囲の協力者の数が少ない場合には仲介し、多い場合に仲介しない戦略が進化したことが分かる。前者の戦略は裏切りの搾取を防ぐ一方で相互協力を増やすので、協力に有利に働くと考えられる。

一方、 $p_n = 0.5$ の時は協力が少し広まる場合と、ほぼ全て裏切りになる場合があつた。 $p_n = 0$ の協力が広まった場合と同じく $act_0 < act_1$ となったが、 act_0 の値はさらに小さく、裏切り同士で仲介を行わないように進化している。

4 まとめ

ネットワーク上の協力の進化に対して、知人同士を引き合るといった仲介行為が与える影響について調べるために、シンプルなモデルを構築し、実験を行い、仲介行為が全体としての協力・非協力の広まり方に影響を与えることを示した。本稿では特に、従来から協力が広まりやすいことが知られている局所性のあるネットワークと、局所性の小さいランダムなネットワークを用いた。また、文化的な性質や社会的な基盤などによって、どれほどの頻度で仲介を行えるかは様々であるが、そのような制限の違いが進化に与える影響について特に注目した。全体として仲介の導入によって協力が促進されたが、仲介の制限が強すぎると協力者の割合は少なく、逆に制限が弱すぎる状況では協力の広まり具合は不安定となり、中程度の場合に平均的に最も協力が促進される傾向にあることが分かった。協力が促進されたのは、仲介者が協力者同士を仲介し、裏切りとは結び付けないような戦略が進化したためだと考えられる。また、局所性のあるネットワークでは仲介の導入によって協力が強く促進される傾向にあったが、局所性の小さいネットワークでは仲介の導入によって必ずしも協力が促進されず、集団全体が裏切りになってしまうこともあつた。仲介の導入による協力の促進は、その社会がそもそも協力を安定的に存在させる構造になっているかに左右されることが示唆された。

参考文献

- [1] Nowak, M. A.: Five rules for the evolution of cooperation, *Science*, Vol. 314, No. 5805, pp. 1560–1563 (2006).
- [2] Suzuki, R., Kato, M. and Arita, T.: Cyclic coevolution of cooperative behaviors and network structures, *Phys. Rev. E*, Vol. 77, No. 2, 021911 (2008).