

相互作用と世代交代の近傍が異なるネットワークにおいて 選択圧が協調進化に与える影響

Evolution of Cooperation on Different Pairs of Interaction and Replacement Networks with Various Intensity of Selection

鈴木麗壘 有田隆也
Reiji Suzuki Arita Takaya

名古屋大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University

There are various discussions on the evolution of cooperation on different pairs of an interaction network for playing games and a replacement network for imitation of strategies. This paper aims at clarifying the relationship between these networks that facilitates the evolution of cooperation by focusing on the intensity of selection for imitation process of strategies. We constructed a model of the evolutionary prisoner's dilemma on different pairs of interaction and replacement networks. The relationship between networks can be adjusted by the scale of interaction and reproduction, and the intensity of selection can be adjusted from the almost deterministic selection of the best strategy to the extremely stochastic selection. The experiments showed the larger scale of reproduction than the scale of interaction brought about higher-level cooperation when the intensity of selection was high, and the minimum scale of interaction and reproduction was the best when the intensity of selection was low.

1. はじめに

利己的集団における協調行動の創発と進化は、社会学、経済学、生物学、工学、複雑系科学など、多様な領域において論じられる学際的なテーマである。特に、囚人のジレンマにおける戦略の進化を題材とした議論は古くからなされており、その中でも、Nowak と May による二次元格子平面における局所的な対戦と進化に基づく先駆的研究 [Nowak 92] をはじめとして、相互作用の局所性は協調行動を促進する代表的なメカニズムの一つとして議論されてきた。これは、局所性が協調者同士の相互作用の頻度を増加させ、クラスタを形成して徐々に広がることを可能にするためである。近年では、実世界のネットワークにおいて遍在する複雑な特性が協調行動の創発に与える影響に関して論じられている [Suzuki 08, Masuda 08]。

ネットワーク上の進化ゲームに関する多くの研究では、ゲームを行う対戦相手を決める近傍と、戦略進化において模倣の対象となる他個体を決める近傍が同一のネットワークを用いて表現されているが、これらは必ずしも一致する必要はない。つまり、各個体は相互作用ネットワークと呼ばれるネットワーク上における近傍の個体とゲームを行う一方で、世代交代ネットワークと呼ばれる別のネットワーク上における近傍の個体から適応的な戦略を模倣するという状況設定がありうる。これは、実世界において、つきあうことで利害関係が直接的に生じる相手と、自身の振る舞い方の参考にする相手が必ずしも一致しないことに相当する。そこで、両者の違いが協調行動の創発に与える影響に関する議論が様々になされているが、得られる知見が異なる場合がある。

例えば、Ohtsuki らは、このような条件のもと、利得が適応度差に与える影響が小さい、いわゆる弱い選択に基づく進化について論じ [Ohtsuki 07]、両者のネットワークの次数が小さく、かつ、一致しているほど協調戦略が集団中に固定しやすいことを解析的に示している。また、Ifiti らは、相互作用と世代交代における近傍の個体数がある閾値を超えると、協調者が生き延びられないことを、連続的な戦略値を用いた囚人のジレンマゲームの戦略進化において示している [Ifiti 04]。これらの研

連絡先: 鈴木麗壘, 名古屋大学大学院情報科学研究科, 名古屋市千種区不老町, Tel/Fax +81-52-789-4258, reiji@nagoya-u.jp

究は、両者のネットワークは同一であり、また疎であるほど、協調行動が進化しやすいと結論づけている。

一方、このような局所性の高い相互作用と世代交代をもたらす状況設定として知られる、限定された拡散（とそれに基づく相互作用）や、集団の粘性の度合いが強すぎる場合には、協調行動の進化がむしろ妨げられる可能性があることも指摘されている。West らはこれらの特性が血縁間の協調的な相互作用の頻度だけでなく、世代交代時の血縁間の競合の度合いも高めてしまうことを指摘している [West 02]。また、いくつかの研究では、囚人のジレンマゲームの戦略の空間的な進化において、相互作用の局所性と世代交代の局所性が異なる条件において協調行動が最も進化しやすいという結論が得られている。Suzuki らは、1次元格子状上における N 人版繰り返し囚人のジレンマゲームの戦略進化において、相互作用を行う近傍の個体の範囲は比較的小さい方が、世代交代の際に競合する近傍の個体の範囲は大きいほど協調行動が進化しやすいことを示した [Suzuki 03]。また、Wu と Wang は 2次元格子状上での囚人のジレンマゲームの戦略進化において、各個体が数リンク先（たとえば近傍の近傍）の個体までの戦略を模倣の対象とする設定で実験を行っている [Wu 07]。実験の結果、模倣の対象とするリンク先数をいくつかのぼすと協調の割合が最も高くなる傾向があることを示しており、これは両ネットワークが異なる方が協調の進化にとって良い条件であることを示している。以上から、一般に相互作用と世代交代のネットワークの間のどのような関係が協調行動を促進するかについては十分な理解が得られていないと言える。

そこで、本研究では、両ネットワークの関係が協調行動の進化に与える影響を決める要因の一つとして、世代交代における選択圧の強さに注目する。従来の進化モデルでは、確率的な弱い選択から決定論的な最良個体の模倣まで、様々な選択の強さが用いられてきた [Traulsen 07] が、その違いと両ネットワークの関係が協調行動の進化に与える影響については議論が不十分であると言える。そこで、本研究では、両ネットワークの関係と選択圧の強さが調節可能な囚人のジレンマ戦略の進化モデルを構築した。本モデルでは、初期の共通したネットワークから、相互作用の規模と世代交代の規模と呼ぶパラメータによって決められた回数だけ近傍の近傍を接続することを繰り返すことで、両ネットワークの包含関係を調節できる。また、世

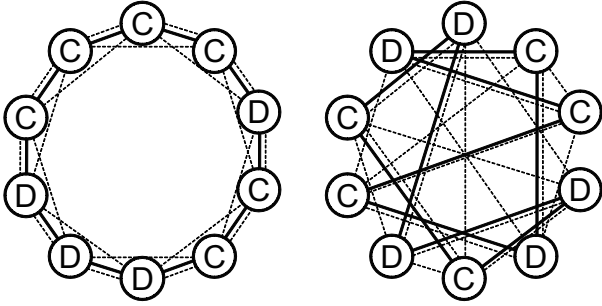


図1: 次数2の一次元レギュラーネットワーク(左), 平均次数2のランダムネットワーク(右)を初期とする相互作用の規模 $KI=0$, 世代交代の規模 $KR=1$ のネットワークの例, 実線は相互作用ネットワークのリンク, 破線は世代交代ネットワークのリンクを表す.

表1: 囚人のジレンマの利得行列

		opponent	
		cooperate	defect
player	cooperate	$(b-c, b-c)$	$(-c, b)$
	defect	$(b, -c)$	$(0, 0)$

(player's score, opponent's score)
 $b > c$

交代における模倣の際には, 選択圧の強さをほぼランダムに近いものから決定論的な最適戦略の模倣まで調節可能である. 本稿では様々な条件で進化実験を行い, 選択圧の強さは協調行動の進化を促進する相互作用と世代交代の規模の条件に大きな影響を与えることを示す.

2. モデル

N 個体からなる集団の各個体はネットワーク上のノードとして表現され, それぞれ1回きりの囚人のジレンマゲームにおける戦略(協調Cもしくは裏切りD)を持つ. 図1に示されるように, 各ノードはそれぞれ相互作用・世代交代の有無を表す2種類の異なるリンクで接続され, それぞれ相互作用ネットワーク, 世代交代ネットワークを構成する.

本モデルでは, 相互作用ネットワークと世代交代ネットワークを次の手順で構築する.

1. まず, 両者に共通する初期のネットワークを設定する. 本研究では, 次数2の1次元レギュラーネットワーク, もしくは, 平均次数2のランダムネットワークを採用する.
2. 相互作用ネットワークに関して, それぞれの個体とその近傍の近傍(2リンク先)の個体を直接接続する操作を, 相互作用の規模と呼ぶパラメータ KI 回繰り返す. 世代交代ネットワークに関して, 世代交代の規模 KR 回同様の操作を繰り返す.

パラメータ KI と KR は相互作用と世代交代に関するネットワーク間の包含関係を決定するものである. たとえば, $KI \geq KR$ の場合, 相互作用ネットワークが世代交代ネットワークを包含する状況であり, $KI = KR$ の場合, 両者は同一である.

表2: 各 T の条件における, すべての KI, KR の組み合わせでの協調者の割合の平均

T	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	5.0
P_c	0.471	0.419	0.091	0.039	0.047	0.116

ゲームは表1で定義される利得を用いた囚人のジレンマである. パラメータ b は協調行動によって生じるメリット, c は協調行動にかかるコストを表している. 各ステップは次のように定義される3つのフェイズからなる.

1. それぞれの個体が相互作用ネットワーク上の直近の個体すべてとゲームを行い, その合計得点を各個体の適応度とする.
2. それぞれの個体は, 自身を含む世代交代ネットワーク上の近傍の個体を持つ戦略のうち一つを次の式に従って確率的に選択する.

$$P_{i,j \in NR_i} = \frac{e^{f_j/T}}{\sum_{k \in NR_i} e^{f_k/T}}, \quad (1)$$

ここで, $P_{i,j}$ は個体 i が近傍の個体 j の戦略を模倣する確率, f_j は個体 j の適応度である. NR_i は世代交代ネットワーク上における個体 i の近傍の個体の集合である. ただし NR_i は個体 i 自身も含むものとする. この選択方法は, ボルツマン選択として知られ, T は選択圧の強さを決定するパラメータである. T が十分小さければ, 模倣の過程は近傍の最も適応度の高い個体の戦略を模倣する決定論的なものになり, T が大きくなるほど模倣の過程は確率的になり, どの個体も等しく選びやすくなる. なお, 戦略の更新は各個体で同時に生じるものとする.

3. フェイズ2において他個体の戦略を模倣した個体に関して, 小さな確率 p_m で戦略の反転が生じる. これは他個体の戦略に関する誤解の発生に相当する.

これらのフェイズからなるステップが繰り返し行われる.

3. 結果と考察

3.1 全般的な傾向

$N = 300, p_m = 0.005, b = 1.0, c = 0.05$ のパラメータ設定を基本的な条件として実験を行った. 初期集団における各個体は $p_c=0.5$ の確率で協調(それ以外は裏切り)の戦略を持つものとした. また, 本稿では, レギュラーネットワークを初期のネットワークにした場合の結果を示す. この場合, 各ネットワークは次数が 2^{KI+1} , および, 2^{KR+1} の1次元レギュラーネットワークである. なお, ランダムネットワークを用いた場合でも基本的に同様の結果が得られている [Suzuki in press].

図2は, $T=0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の各条件において, 様々な KI と $KR (0, \dots, 3)$ の設定を用いた場合の500ステップ中終盤の200ステップにおける協調者の割合 (P_c) の平均値を示したものである. 各値は40試行の平均値である. 同図から, 選択圧の強さを表すパラメータ T は協調者の割合の最大値をもたらす KI と KR の条件に大きく影響していることがわかる.

表2は, 図2における各 T のグラフで, 協調者の割合をすべての KI と KR の条件に関して平均したものである. 協調

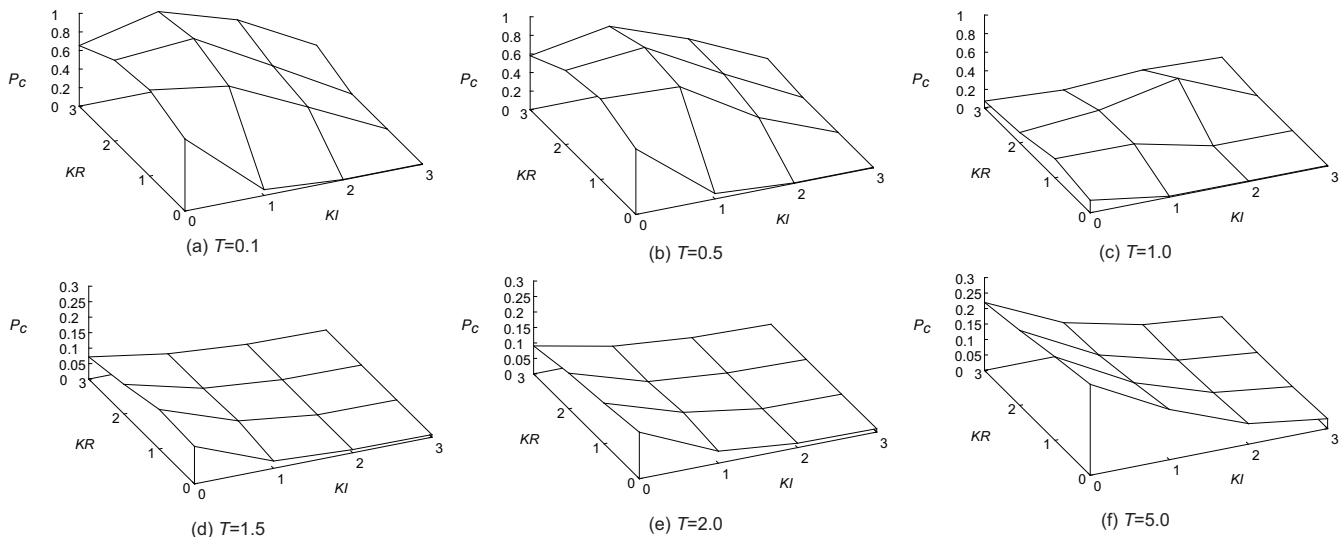


図2: 各 T , KI , KR の条件における協調者の割合

者の割合は T が 0.1 から 1.5 に増加するにかけて急激に減少している。これは、近傍の個体からより良い戦略を積極的に選ぶことが協調行動の進化に大きく寄与することを示している。これは次の2つの理由によると考えられる。ひとつは、定義から協調者のクラスターに属する個体の適応度が裏切り者のクラスターに属する個体の適応度より高く、この意味で T が小さい方が協調者を選びやすいためである。もう一つは、 T が大きく確率的に模倣する場合は、戦略の分布が乱雑になり、協調者のクラスターに裏切り者が出現して広まる頻度を高めるためである。一方、 T がさらに大きくなると、 $T=2.0$, 5.0 の場合のように協調者の割合は増加する傾向があった。これは、選択の過程が純粋なランダム選択に近くなり、その場合の期待値である 0.5 に近づいているためであると推測される。

3.2 選択圧が強い場合の戦略進化

図 2 (a), (b) が示すように、 T が小さい (0.1, 0.5) の場合、協調者の割合は全体として $KR \geq KI$ の条件で大きくなり、逆に $KR < KI$ の場合に小さくなる傾向があった。なお、 $T=0.1$ の場合での協調者の割合の分布は、 $KI=KR=0$ の場合をのぞいて常に最適な戦略を模倣する場合 ($T \rightarrow 0.0$) とほぼ同様であった。この場合、 $KI=1$, $KR=2$ の条件で協調者の割合のピーク (0.94) が生じており、その条件から離れるに従って値が緩やかに減少していることがわかる。つまり、選択圧が強い場合、協調行動の進化は世代交代の規模が相互作用の規模よりも大きい条件で最も促進されるということである。この意味で、この結果は Wu らの知見 [Wu 07] に基本的に沿うものであり、彼らが用いた選択圧は比較的強いものであったことが推測される。

ここで、 $T=0.1$ の条件における $KI=KR=1$ と $KI=1$, $KR=2$ の場合での集団の振る舞いの違いに注目して、世代交代の規模が大きいことが協調行動の進化に寄与した理由を検討する。図 3 は、両条件における協調者の割合の推移を示したものである。 $KI=KR=1$ の場合、協調者の割合は初期数ステップでの急激な減少の後にゆっくり増加し、約 180 ステップまでに 0.8 程度に至り振動した。一方、 $KI=1$, $KR=2$ の場合、協調者の割合は約 30 ステップまでに 0.95 にまで達し、高い値を維持した。この違いは突然変異によって生じる裏切り者のクラス

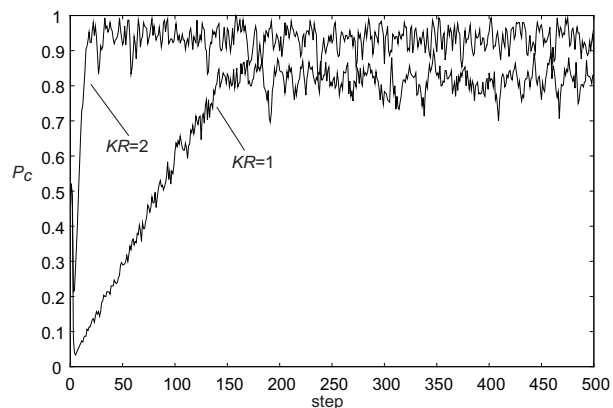


図3: $KI=1$, $KR=1, 2$ の条件における協調者の割合の推移

タの侵入に対する協調集団のロバスト性の違いによってもたらされていると考えられる。図 4 は協調者の集団に 3 体の裏切り者のクラスターが存在する状況を図示したものである。ここでは選択圧が最も強い場合として、各個体が常に適応度の最も高い個体の戦略を模倣すると仮定し、両条件での進化過程の違いについて検討する。 $KI=KR=1$ の場合では、中央の裏切り者は、その隣の裏切り者の適応度が最も高い (2.0) ため、自身の戦略を変更しない。一方、 $KI=1$, $KR=2$ の場合では、中央の裏切り者は、自身の裏切り者の影響が届かない離れたところに存在して高い利得 (3.8) を得ている協調者を模倣し協調に転ずる。どちらの場合でも両端の裏切り者は協調者の戦略を模倣するため、後者の場合では裏切り者のクラスターは絶滅するのに対し、前者は中心の裏切り者が生き残って再び侵入を繰り返す結果になる。このような、直接的な相互作用のない協調者からの模倣は、世代交代の規模が相互作用の規模より大きく、また、集団が主に協調者で構成されている場合において頻繁に生じると言える。

しかし、世代交代の規模が大きいことは、同時に協調行動の

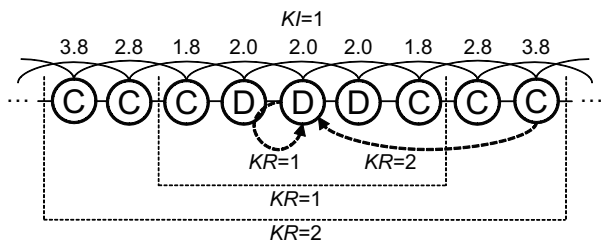


図 4: $KR=1$, $KR=1$ または 2 の場合における模倣過程の例。リンクは相互作用ネットワークを表し、下の囲みは各 KR の条件の際に中心の裏切り者が模倣の候補とする個体の範囲を表している。破線で表された矢印は近傍の最良個体を模倣した場合の典型例である。

進化に対して少なくとも次の 2 つの悪影響を与える。ひとつは、世代交代の規模が大きくなるに従い、突然変異で生じた裏切り者の侵入の影響を強めることである。定義から、協調者ばかりの集団からなる突然変異で生じた裏切り者は、次のステップでその近傍の 2^{KR+1} 個体からその戦略を模倣され、広がることが可能である。もう一つは、各個体は他の $2^{KR+1} + 1$ 個体から模倣の相手を選択するため、世代交代の規模が大きいくほど最良個体を選ばれる確率が相対的に下がり、選択圧の強さを非明示的に下げる効果があるということである。従って、大きな世代交代の規模が協調行動の進化に与える正味の寄与は、これらの影響のバランスに依存し、この設定では $KI=1$, $KR=2$ の時に最もバランスがとれた結果であったと言える。選択圧が低くなると先に挙げた協調者にとってのメリットを下げるため、協調者の割合の平均は特に $KR \geq KI$ の条件で、 T が 0.1 から 1.0 に増加するに従って小さくなる傾向があった。その結果、 $T=1.0$ の場合には、 KI と KR が同一 ($KI=KR=2$) の場合に協調者の割合が最大になったと考えられる。

一方、 $KR < KI$ の場合に協調者が集団中を占めることが難しいのは自明である。この場合には、それぞれの個体にとって模倣の相手すべてがゲームをする相手であり、 KI と KR の差が大きくなるほど進化の過程は局所性が無く裏切りが常に高い利得を得る条件に近づくためである。

3.3 選択圧が弱い場合の戦略進化

T が大きい (1.5, 2.0, 5.0) 場合、協調者の割合は KI が小さいときに相対的に大きくなる傾向があった。特に、 $T=2.0$, 5.0 の場合には相互作用の規模と世代交代の規模がともに最小の場合に ($KI = KR = 0$) そのピーク (0.15, 0.29) が生じ、この意味で Ohtsuki らの知見 [Ohtsuki 07] に沿うものであった。選択圧が弱い条件では、先に挙げた理由で協調者の割合が基本的に小さく、協調者と裏切り者が混在しやすい傾向がある。そのため、協調者のクラスターが裏切り者の集団の中を生き延びるには、相互作用と世代交代をともに強く制限することで異種 (裏切り者) から搾取されないことが重要であったと言える。

4. おわりに

本稿では、相互作用と世代交代のネットワークの関係が協調行動の進化に与える影響を決める要因の一つとして、世代交代における選択圧の強さに注目し、両ネットワークの関係と選択圧の強さが調節可能な囚人のジレンマ戦略の進化モデルを構築し、実験と解析を行った。その結果、選択圧が強い場合には、

世代交代の規模が相互作用の規模より大きい場合に協調行動が進化しやすいことが判明した。一方、選択圧が弱い場合には、相互作用の規模と世代交代の規模がともに最小の場合に協調者が最も広まりやすいことがわかった。

実社会では、各主体があるゲーム的相互作用の結果を自身の将来の振る舞いに反映する方法は様々にありうる。本モデルでの選択圧の強さはこの違いをあらわすものの一つとして捉えることができ、例えば、選択圧が強い場合はいつも最も利益の多い主体の振る舞い方に飛びつく社会に相当し、弱い場合は利益の差にあまりこだわらない社会に相当すると考えられる。本研究で得られた知見は、前者の場合は直接つきあう相手同士で見習った方が社会全体として良い一方で、後者の場合には、視野を広げて直接のつきあいのない相手からも見習うことが、社会全体の協調性を強固なものに示唆していると言える。

参考文献

- [Nowak 92] Nowak, M. A. and May, R. M.: Evolutionary games and spatial chaos, *Nature*, Vol. 359, pp. 826–829 (1992).
- [Masuda 08] 増田直紀: ネットワーク上の進化ゲーム, 人工知能学会誌, Vol. 23, No. 5, 652–658 (2008).
- [Suzuki 08] Suzuki, R., Kato, M. and Arita, T.: Cyclic coevolution of cooperative behaviors and network structures, *Physical Review E*, Vol. 77, No. 2, 021911 (7 pages) (2008).
- [Ohtsuki 07] Ohtsuki, H., Pacheco, J. M. and Nowak, M. A.: Evolutionary graph theory: Breaking the symmetry between interaction and replacement, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 246, No. 4, pp. 681–694 (2007).
- [Ifti 04] Ifti, M., Killingback, T. and Doebeli, M.: Effects of neighborhood size and connectivity on the spatial continuous prisoner's dilemma, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 231, pp. 97–106 (2004).
- [West 02] West, S. A., Pen, I. and Griffin, A. S.: Cooperation and competition between relatives, *Science*, Vol. 296, pp. 72–75 (2002).
- [Suzuki 03] Suzuki, R. and Arita, T.: Evolutionary analysis on spatial locality in N-person iterated prisoner's dilemma, *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, Vol. 3, No. 2, pp. 177–188 (2003).
- [Suzuki in press] Suzuki, R. and Arita, T.: Evolution of cooperation on different pairs of interaction and replacement networks with various intensity of selection, *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation* (in press).
- [Wu 07] Wu, Z. and Wang, Y.: Cooperation enhanced by the difference between interaction and learning neighborhoods for evolutionary spatial prisoner's dilemma games, *Physical Review E*, Vol. 75, 041114 (7 pages) (2007).
- [Traulsen 07] Traulsen, A., Pacheco, J. M. and Nowak, M. A.: Pairwise comparison and selection temperature in evolutionary game dynamics, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 246, No. 3, pp. 522–529 (2007).