

協力進化における間接互惠性と空間的局所性の相互作用に関する ゲーム論的検討*

陳 煥新^{†1} 鈴木 麗璽^{‡2} 有田 隆也^{‡2}

¹ 名古屋大学 情報文化学部[†]

² 名古屋大学 大学院情報科学研究科[‡]

1 はじめに

自然選択に基づく適応進化によれば生物は利己的であるはずだが、ヒトや一部の生物において協力行動は頻繁に見られる。協力の起源については、様々な分野で議論がなされてきたが、その中でも進化ゲーム理論に基づくアプローチは有力である [1, 2]。一般に、協力行動を説明する理論は、報酬が後に直接的に自身に戻ることに基づく個体レベルのメカニズムと、報酬が自身と同じ遺伝子を持つ他者に渡ることに基づく遺伝子レベルのメカニズムに2分できる [3]。ただし、両メカニズムは共存しているはずであるが、両メカニズム間の相互作用の果たす影響については十分解明されていない。

本研究では、個体レベルと遺伝子レベルのメカニズムの典型として、それぞれ、間接互惠性と空間的局所性を取り上げ、両者の相互作用に焦点を合わせる。間接互惠性とは、協力した対象とは別の他者から協力を受けることに基づく [4]。例えば、ある個体が協力するとそれを知った他者においてその個体の評判が上がること、評判の高い個体に協力がちであることの両者が成立すれば、協力は進化しう。一方、空間的局所性とは、ランダムに選出された個体同士で相互作用するのではなく、集団構造に影響を受けて相互作用相手が決まることに基づく [5]。例えば、協力者のクラスタができると、クラスタ内で協力者たちは相互に協力し合うので、報酬/コストが十分高いと裏切り者より適応度が高くなる。そのため、そのクラスタは拡張し、協力が進化しう。本稿では、両メカニズムの相互作用を検討するためのシンプルなエージェントベースモデルを作成し、シミュレーション実験を行なった。

2 モデル

2.1 寄付ゲーム

寄付ゲームは2人のプレイヤーが行い、1人が寄付者として、もう1人が受益者の役割をもつ。寄付者だけが受益者に対して、協力するか協力しない(裏切り)かを選択する。協力するなら c のコストを支払い、受益者の資源は b ($b > c$) 増加する。協力しないなら、両者の資源は変化しない。

2.2 モデルの概要

個体数 N の集団は2次元非トーラス平面 ($width \times height$) に存在し、動かないものとする。この平面上での2個体間の距離は両者間の社会的な相互作用の強さを表す。各個体は、寄付ゲームの戦略、利得の合計としての資源、評判(整数値の「イメージスコア」で表現)を持つ。戦略として全面協力、全面裏切り、評判依存戦略の3種類があり、各個体は対応した遺伝子3つのうちの1つをもつ。

アルゴリズムを以下に示す。

- (1) 初期世代個体を平面上にランダムに配置する。
- (2) 適応度を0に設定し、各個体の戦略とイメージスコア(の

正負)をランダムに設定する。

- (3) 寄付ゲームの実行とその結果に基づく評判の設定を S ラウンド繰り返す(詳細は後述)。
- (4) 各個体は自身を含む近傍個体(距離 R 以内)の中で最大適応度の個体の遺伝子をコピーする。
- (5) 確率 P_m で突然変異により自身の遺伝子(戦略)を3つのどれかにランダムに置き換える。
- (6) G 世代に達するまで(2)に飛ぶ。

2.3 ゲームの実行

個体間の相互作用(ゲームプレイと評判の伝搬)は以下の確率で実行される。

$$P(i, j) = \frac{1}{1 + e^{\frac{-\alpha + d(i, j)}{\beta}}} \quad (1)$$

ここで、 $P(i, j)$ は i と j の距離 $d(i, j)$ を独立変数とするシグモイド関数である。 $d(i, j)$ がパラメータ α と一致するときに $1/2$ となり、それ以上で0、それ以下で1に近づく。パラメータ β は $d(i, j)$ が α を超える(切る)時の立ち下がり(立ち上がり)の急激さを決定する。したがって、 β が大きいほど空間的局所性が小さいことを意味する。

各個体は他全個体に関して同式を使ってゲームをするか決定し、する場合には遺伝的に決定された戦略でゲームを行う。それが評判依存戦略の場合、再び、同式の確率で相手の評判を利用し、利用しない場合は、ランダムに協力が裏切りかを選択する。評判を利用する場合は、前ラウンドの相手のゲームプレイに応じて設定された評判がよい(イメージスコアが0以上)場合には協力し、悪い場合には(0未満)裏切る。

2.4 評判の設定

全個体に関して、直前のラウンドにおけるゲームで選択した戦略に応じてイメージスコアを設定する。イメージスコアに基づく間接互惠の提案論文 [1] では、協力したなら +1、裏切ったなら -1 を加算する、行動だけに依存したルールが採用された。ただし、受益者の評判を考慮することの重要性が指摘されている [7]。そこで、本研究では、オリジナルのルールは3.4で検討するにとどめ、評判のよい受益者に協力した場合と評判の悪い受益者を裏切った場合に +1、それらでない場合に -1 を加算するルール [6] を採用した。

3 実験

用いたパラメータの値は以下の通りである： $width = 100$, $height = 100$, $N = 100$, $P_m = 0.01$, $G = 10,000$, $S = 20$, $R = 20$, $b/c = 5$, $\alpha = 15$, $\beta = 5$ 。初期世代の個体の戦略はランダムに決定される。10試行実験をした。

3.1 全般的な傾向

10試行のうち、9試行で評判依存戦略が支配的となり、平均協力率は0.73であった。残りの1試行では裏切り戦略が支配的であった。図1に前者の場合の典型的な1試行における進化の様子を示す。評判依存戦略が急速に集団を支配した後、全面協力が増えた後に全面裏切りが増える様子がよく観察されたが、多くの場合、集団全体には侵入できなかった。このとき平均協力率が1に至らなかった理由は、評判依存戦略が自身から遠い相手とゲームした際に相手の評判を知らず、ランダムに行動を選択したためと考えられる。裏切り戦略が支配的な試行では、ある世代に全面裏切りが集団全体に侵入し、そのまま収束した。

* Interaction between Indirect Reciprocity and Spatial Locality in the Evolution of Cooperation: A Game theory Approach

[†] Huanxin Chen

School of Informatics and Sciences, Nagoya University

[‡] Reiji Suzuki, Takaya Arita

Graduate School of Information Science, Nagoya University

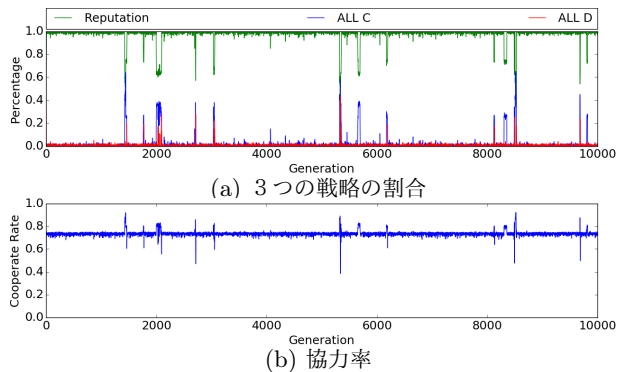


図 1: 基本実験における典型的試行での進化の様子

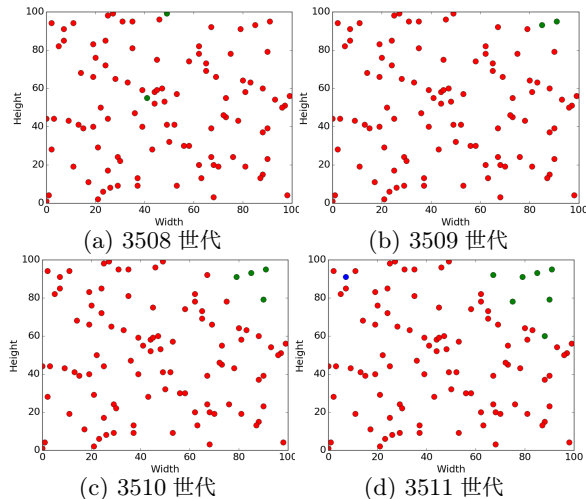


図 2: 各世代における戦略の分布

3.2 初期世代を全面裏切り集団とした場合

前節の実験の 1 試行では、一旦全員が裏切り戦略になった後は協力行動は創発しなかった。そこで、全面裏切り集団から協力行動が創発しうかどうかを詳細に調べるため、初期世代をすべて全面裏切り戦略の集団として 50 試行実験した。そのうち、協力行動が創発したのは 3 試行で確認され、そのすべてで評判依存戦略による協力行動のクラスタが見られた。図 2 は協力行動が創発した際の世代ごとの戦略の分布を示したものである。個々の点は個体を表し、色が戦略を示している (赤: 全面裏切り, 青: 全面協力, 緑: 評判依存戦略)。3508 世代のような全面裏切り集団の中に、3509 世代のように評判依存戦略 2 個体 (図中右上) が突然変異で隣接して出現すると、3510 世代以降で徐々にそのクラスタが拡大し、維持される。3511 世代でクラスタを構成する評判依存戦略の平均協力率は 0.6 であり、協力行動が創発したと言える。評判依存戦略は、相手の評判が分かっているならば評判を下げないように行動する。これらの戦略が隣接すると互いに評判を高めつつ協力し合う一方、評判の低い他の全面裏切りには協力しないため、大きな利得を得てクラスタを拡大することができる。従って、全面裏切り集団から協力行動が創発するには、評判依存戦略による協力のクラスタが必要不可欠であった。

表 1: α と β が協力行動の割合 (%) に与える影響

$\alpha \backslash \beta$	2	5	20
10	39.94	9.51	0.43
15	33.46	2.48	0.28
20	1.38	0.33	0.26

3.3 局所性を変更した場合

空間的局所性に直接的に関係するパラメータである α と β を表に示すように変更した条件を用い、前節で注目した試行の 3509 世代目 (図 2b) を初期集団として、20 世代分の試行を各条件で 100 試行ずつ行った。表 1 は各条件における最終世代での協力行動割合の平均 (%) である。 α または β が大きくなるほど、つまり、局所性が弱くなるほど、割合は小さくなり

協力行動の創発が難しくなった。つまり、間接互惠と空間的局所性が相互作用した結果、協力行動が創発したと言える。

3.4 受益者の評判を考慮しない間接互惠の場合

2.4 に示した寄付者の行動のみで評判を設定するオリジナルのルールに変更して実験を行った。結果として、行なった 10 試行全てにおいて、最初の数十世代で全面協力戦略が増え集団を占めた後、全面裏切り戦略に侵入され収束した。この設定では、評判依存戦略が評判を知らない遠くの相手に対しランダムに裏切りを出すことで常に評判が悪くなるため、これをきっかけにして評判依存戦略同士で裏切りあって評判を落とす傾向がある。これが全面協力戦略による評判依存戦略への侵入を可能にしたと考えられる。従って、従来研究 [7] と同様に、相互作用する際、行動する者だけではなく行動する相手の評判も考慮することが必要であることが本研究でも示された。

3.5 報酬/コストを変更した場合

ゲームの報酬/コスト (b/c) は間接互惠性 [1] や空間的局所性 [2] による協力行動の創発を考える上で重要な要因であることが指摘されている。そこで、 b/c が両者の相互作用にどのように影響するかについて、 b/c を 3 と 12 に変えた条件で実験を行った。その結果、 $b/c = 3$ の場合、基本実験と比べて全面協力が侵入しにくくなり、協力行動は進化しにくかった。一方、 $b/c = 12$ の場合、全面協力が頻繁に侵入して優勢になった試行がいくつか確認された。従って報酬/コストが低くなると全面協力が侵入しにくくなり、高くなると全面協力が侵入しやすくなることがわかった。Ohtsuki ら [2] は、ネットワーク上の協力行動の進化において、 b/c が平均次数を上回る場合に協力行動が進化しうること示している。基本実験では相互作用する相手数の平均は約 12 だったが、上記の条件に当てはまらない $b/c = 5$ の場合でも評判依存戦略に基づく協力行動が創発したため、空間的局所性と間接互惠性が、協力行動の進化をより促進したことが示唆される。

4 おわりに

本研究では間接互惠性と空間的局所性の相互作用が協力行動の創発に及ぼす影響をシンプルなエージェントベースモデルを用いて検討した。空間的局所性が存在する場合、評判依存戦略のクラスタが進化し協力行動が創発しうことを示した。今後は評判の伝搬に関する相互作用とゲーム的な相互作用に関する局所性が分けられる場合、間接互惠性と空間的局所性がどう相互作用するかについて検討したい。

参考文献

- [1] Martin A Nowak and Karl Sigmund. Evolution of indirect reciprocity by image scoring. *Nature*, 393(6685):573–577, 1998.
- [2] Hisashi Ohtsuki, Christoph Hauert, Erez Lieberman, and Martin A Nowak. A simple rule for the evolution of cooperation on graphs and social networks. *Nature*, 441(7092):502–505, 2006.
- [3] Stuart A West, Claire El Mouden, and Andy Gardner. Sixteen common misconceptions about the evolution of cooperation in humans. *Evolution and Human Behavior*, 32(4):231–262, 2011.
- [4] Richard D Alexander. *The biology of moral systems*. Transaction Publishers, 1987.
- [5] Martin A Nowak and Robert M May. Evolutionary games and spatial chaos. *Nature*, 359(6398):826–829, 1992.
- [6] Gilbert Roberts. Evolution of direct and indirect reciprocity. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 275(1631):173–179, 2008.
- [7] Hisashi Ohtsuki and Yoh Iwasa. The leading eight: social norms that can maintain cooperation by indirect reciprocity. *Journal of Theoretical Biology*, 239(4):435–444, 2006.