6P-1

協調的分配ゲームにおける利他的行動の創発

新美 文幸†　　鈴木 麗璽‡　　有田 隆也‡

名古屋大学情報文化学部†　名古屋大学大学院情報科学研究科‡

1 はじめに

他人からもらっても自分からは与えない。社会には自分の利益だけを考える利己的な人がいる。一方で、他人からもらわなくても与えるといった利他的行動も存在する。あえて自分の儲けを少なくして他人に配る。社会性の起源とも考えられることがどのように起こりうるのだろうか[1]。本研究では協調的な分配がいかに創発するかを調べるため「配分のジレンマゲーム」を提案している。このゲームは、囚人のジレンマとは異なり、経済、社会の基本である配分行為を対象とし、協力か裏切りかの二者択一ではなく、配分範囲を表わす連続的な値を戦略として、各個体の相互作用の大きさを決める。

2 モデル

2.1 配分のジレンマゲーム

p 個の個体をトーラス状に 1 次元配置する。自分から配る相手までの距離を配分半径 r とし、これだけで相互作用の大きさを表す。配分半径の大きさはどの程度自分以外のことを考えるか、つまり利他性を表している。それぞれの配分半径は乱数を使ってランダムに決める。配分相手の数は自分も含めて $2r+1$ 個体となる。たとえば $r=0$ の場合は自分だけに配分し、$r=2$ の場合は自分 1 個体と左右各 2 個体の合計 5 個体に配分する。配分量 f は 1 個体が近傍の各個体に配る量で、

$$\text{配分量}\quad f=\left(\frac{1}{2r+1}\right)^{d} \qquad \text{(式1)}$$

で表す。ここで d は配分重みである。d=1 ならばまわりに 1 / $(2r+1)$ ずつ与え、配る総量は 1 となる。d=0 ならばまわりの各個体に等しく 1 を配分し、与える総量は $2r+1$ となる。$0<d<1$ では、1 つの個体にとっては配分半径が小さいと利得が大きくなるが、全体にとっては配分半径が大きいと利得総量が大きくなる。このように $0<d<1$ における配分にはジレンマ状況が存在する。

2.2 進化手法

近傍の個体の中で最高利得をもつ個体の配分半径を真似ることで戦略は伝播する。真似る相手までの距離を真似半径 m とすると自分を含め $2m+1$ 個体が真似る対象となる。全個体は同じ値の真似半径をもつ。初期値依存を排除するため、戦略伝播時に一定の突然変異率で配分半径をランダムに変える。このように配分と真似と突然変異を繰り返して進化させる。

3 実験

3.1 予備的分析

基本的分析のため突然変異を入れないで実験した。65 個体を 1 次元に配列する。各個体の配分半径は 0～32 の範囲でランダムに設定し、真似半径 m、配分重み d を変えて世代変化を観察した。図の下方向に世代 t は進む。

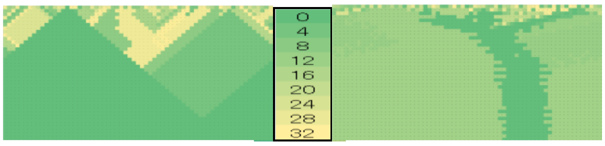

図１ 世代変化（左右に伝播）m=1 d=1.0　↑ 半径色　図２ 世代変化（クラスタ発生）m=4 d=0.0

図１は m=1、d=1.0 の結果で配分半径の小さい個体が世代毎に左右に伝播している。図２は m=4、d=0.0 の結果で半径 8 の大集団の中に半径 0 のクラスタが発生している。境界が蛇行しているのは真似るべき最高利得の個体が複数あるときはランダムに選択していることによる。

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
r	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0	0	0	0	0	0	8	8	8
利得	17	17	16	15	14	13	12	11	11	11	12	12	12	12	12	12	11	11	11

真似半径 m=4

図３ クラスタ境界の利得

図３は d=0、m=4 におけるクラスタの例である。半径 8 と半径 0 の境界に注目する。境界の半径 8 は隣の半径 0 からもらえないため利得が半径 0 の個体よりも 1 だけ少ない。ところが、その半径 8 は半径 0 が真似る相手である。つまり、半径 0 は自分が原因で真似る相手が少ない。一方、境界の半径 8 側から見ると、利得は半径 0 のほうが 1 だけ多いものの、左の奥に行くほど半径 0 の影響が薄れ、利得が大きい半径 8 の仲間がいるので半径 8 を真似る。つまり、配分半径が小さい集団は自分がまわりに与えないことが原因で壁ができて孤立する。

集団全体を表現するための統計量として平均配分半径の推移を観察した。p=65 で 10 試行したところ、どの試行も 10 世代以内で急速に収束した。d=1.0 の場合はほとんど半径 0 になり、d=0.0 の場合は収束値にバラツキが大きく、振動するケースも観察され、d=0.5 は両者の中間的な様相を示した。

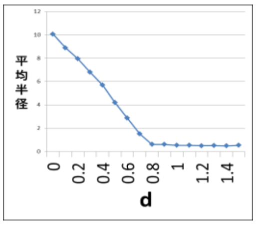

図４ 配分重み d による平均半径変化

配分重み d を 1.5 から減少させていくと d=0.7 付近で平均半径が直線的に増加し始めることがわかった（図４）。

3.2 実験結果

突然変異率=0.01 における 1 次元の世代変化を図５に示す。実験条件は個体数 65、最大配分半径 32、真似半径 m=10、配分重み d=0.5 である。世代 t=5 で半径 6 が支配的になるが、t=25 で出現した半径 1 が t=31 には全体に蔓延している。

図５ 一次元の世代変化

突然変異率を変えた実験（図６）において率が 0.006 以上では結果に違いは見られなかったため、以降の実験

Emergence of altruistic behavior in the distributive dilemma game

Fumiyuki Niimi†, Reiji Suzuki‡ and Takaya Arita‡
School of Informatics and Sciences, Nagoya University†
Graduate School of Information Science, Nagoya University

では突然変異率を 0.01 に固定した。また、突然変異ありのとき平均利得の変化は平均半径の変化に連動していることを確認した。

配分重み d を 0.002 刻みで変化させて観察した結果が図７である。d を 1.0 から下げていくと平均半径は d=0.63 付近で増えだし、d の減少とともに直線的に増加後、d=0.10 付近で横ばいになり、d=0.00 で跳ね上がった。

さらに d を刻んで実験し平均半径が立ち上がる点 d=0.6309 を得た。

次に、真似半径 m による平均配分半径の変化を図８に示す。平均半径のピークは、d=0.5 では真似半径 m が個体数の 1/8 付近にあり、d=0.0 に近づけると個体数の 1/4 付近に近づく。d=0.5 において、個体数を p=129、p=257 と大きくしても平均半径がピークとなる点は m=p/8 付近だった。また、最大配分半径を変えても r=12 以上では m=p/8 の関係を保った。

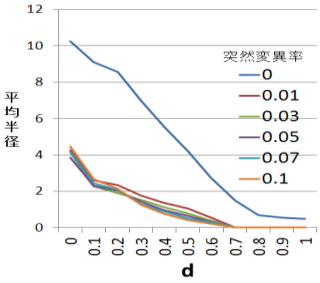

図６　配分重み d による平均半径変化（突然変異率比較）

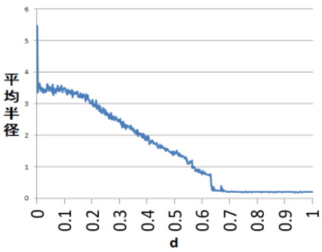

図７ d=0.002 刻みの平均半径変化

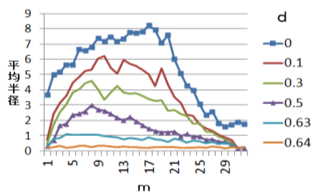

図８ 真似半径 m による平均半径の変化

3.3　２次元への拡張

配分半径をチェビシェフ距離とした２次元版に本ゲームを拡張して実験した。図９は１試行例で、個体数 p =19x19 、最大配分半径 r =9 真似半径 m =1 、配分重み d =0.5 での試行の推移である。１次元配置と同様に急速に収束している。全体的に半径２が占め、部分的に半径０のクラスタができている。また、２次元配置においても１次元と同様に d=0.63 付近以下で平均半径が増加し始めた。

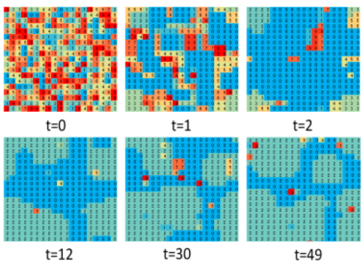

図９　２次元配置における世代変化

4　考察

１次元配置で配分半径 r と０の集団が接している状態を考える（図 10）。上段は個体番号、下段は配分半径を表わす。配分半径０の個体中では、配分半径 r に接している５番個体の利得が最大で、これを $G0$ とする。配分半径 r の個体中で最大利得を Gr とすると、配分半径 r が伝播する条件は $Gr \geqq G0$ であるから次式が成り立つ。

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r	r	r	r	r	0	0	0	0	0

図 10 半径 r と半径０が接している状態

$$Gr = \left(\frac{1}{2r+1}\right)^d \times (2r+1) \quad \geq \quad G0 = 1 + \left(\frac{1}{2r+1}\right)^d \times r \qquad （式２）$$

対数をとって整理すると、

$$d \leq \frac{\log(r+1)}{\log(2r+1)} \qquad （式３）$$

これが利他性伝播の条件となる。

２次元の場合（図 11）、半径０の個体の集団は角の個体が最大利得を持つ。利他性伝播の条件は、

r	r	r	r	r
r	r	r	r	r
r	r	0	0	0
r	r	0	0	0
r	r	0	0	0

図11 ２次元配置での半径 r と半径0

$$Gr = \left(\frac{1}{(2r+1)^2}\right)^d \times (2r+1)^2$$

$$\geq \quad G0 = 1 + \left(\frac{1}{(2r+1)^2}\right)^d \times \left((2r+1)^2 - (r+1)^2\right) \qquad （式４）$$

式４を整理すると、

$$d \leq \frac{\log(r+1)^2}{\log(2r+1)^2} = \frac{\log(r+1)}{\log(2r+1)} \qquad （式５）$$

これは１次元での結果（式３）と一致する。r=1 を代入すると d=log2/log3=0.6309 となり実験結果と一致する。これは利他性が創発した点であり**利他性創発点**と呼ぶ。

式３に r=2 を代入すると d≦log3/log5=0.6826 となる。式３は単調増加関数なので、r >1 では利他性創発点が上昇してしまい実験結果と一致しなくなる。d = 0.68 で r=2 が伝播するか確認するため次の実験を追加した。初期状態として全個体を r=0 で満たし、そこへ連続した５個体の r=2 を置いて世代変化させると r=2 が支配的になったが、その後、突然変異で発生した r=1 に負けて駆逐され、次に r=0 が発生したとき、配分重み d は利他性創発点 0.6309 を越えているため r=1 は負けて r=0 が支配した。r=1 と r=2 の境界における利得の均衡点を計算すると、d = log(4/3) / log(3/5) = －0.56 ＜0 となり、0<d<1 では均衡点は存在できず、常に r=1 が r=2 に勝つことが証明できる。したがって r > 1 でも利他性創発点は d=0.6309 を超えることができない。

真似半径によって平均半径の変化にピークがある。これは真似範囲が小さすぎても、大きすぎても利他性が低くなることを示している。

5　まとめ

本研究では配分のジレンマゲームを提案し、配分行為を対象として利他性の創発の可能性を調べた。このゲームにおいて、配分重み d は全体量の増える度合いを表す。d=1 は総量不変の分割配分であり、食料などの配分に相当し、d=0 は情報の配分のように複製によって総量が増えていくことに相当する。d>0 では自分の取り分が他者への配分によって減るが、それにも関わらず、独占しない（配分半径 r が０でない）個体が空間的局所性のために創発することが示された。また、そのような創発が起こる境界として、１次元配置でも２次元配置でも同じ値である利他性創発点が存在することを実験的、かつ理論的に説明することができた。さらに、配分半径の伝播のための相互作用の大きさ（真似半径）に関して利他性が最大になるピークが存在し、それが大きすぎても小さすぎても集団全体の利得の総量が小さくなることもわかった。

参考文献

[1] 有田隆也：人工生命(改訂２版),医学出版(2002)