

N 人版繰り返し囚人のジレンマゲームにおける 空間的局所性の影響とその動的な進化

* 鈴木 麗璽

名古屋大学 大学院人間情報学研究科
〒464-8601 名古屋市千種区不老町
+81-52-789-4235
reiji@info.human.nagoya-u.ac.jp

Abstract

利己的集団における協調行動の進化において、空間的局所性は相互作用と世代交代の 2 つの要素に分けることができる。我々は、この 2 つの要素が協調行動の創発に与える影響を明らかにするため、空間的局所性の進化を導入した N 人版繰り返し囚人のジレンマゲームの戦略の進化モデルを構築し、進化実験を行った。具体的には、N 人版繰り返し囚人のジレンマゲームの戦略個体を 1 次元グリッド上に配置し、各個体は遺伝的に保持する相互作用の規模（どの個体と相互作用を行うか）と世代交代の規模（どの個体から選択が行われるか）に基づいてグループを形成しゲームおよび世代交代を行うものとした。本稿では、相互作用の規模の進化を導入した場合、世代交代の規模が小さいときに、導入しない場合と比べ高い協調の比率を維持できたことなどについて示す。

1. はじめに

利己的集団における協調行動の進化に関して、繰り返し囚人のジレンマゲーム (Iterated Prisoner's Dilemma, IPD) の戦略の進化を用いた研究が多くなされてきた。有田らは、ジレンマゲームを行う戦略集団を、動的要因を集団の構成要素自体が内包する環境とみなし、動的環境における進化と学習の相互作用について知見を得るために、表現型可塑性を導入した繰り返し囚人のジレンマゲームの戦略の進化モデルを構築し、進化と学習の相互作用の一種である Baldwin 効果が戦略進化の過程で確認されたことを示した [Arita 00]。

一方、IPD の戦略の進化に対して、より現実的・一般的な拡張を行ったモデルを採用した研究がなされてきた。その拡張の代表的な例として、次のような拡張を挙げることができる。ひとつは、局所性の導入である。IPD における戦略の進化実験に関する研究では、集団内の各個体が他のすべての個体と対戦を行う、総当たり戦の設定が一般的なものとして用いられている。しかし、現実の社会構造を考えると、各個体が他のすべての個体と直接結合しているのではなく、ある程度の局所性を持って相互作用を行っていると考えられる。Grim らは、2 次元平面上にジレンマゲームの戦略個体を配置し、各個体は平面上の近傍とのみゲームを行う設定を用いて進化実験を行い、局所性のない環境と比べより協調的なしっぺ返し戦略が集団を支配可能であることを示した [Grim 96]。また、鈴木らは、前述の表現型可塑性の進化モデルを 2 次元平面に拡張し、局所性の度合いに応じて、進化の過程に与える表現型可塑性の影響が異なることを示した [Suzuki 00]。しかし、空間的局所性を導入した従来の研究は、空間的局所性に関して区別して考慮することのできる 2 つの要素、すなわち個体がゲームを行う対戦相手を選択する際に生じる局所性と、各サイトにお

ける次世代の個体を選択する際に生じる局所性を同一のものとして扱っている点で局所性の影響を十分議論していないと考えられる。これら 2 つの要素が集団の進化に与える影響は本質的に異なっているにもかかわらず、これらを区別した十分な議論がなされていない。

もうひとつの拡張は、N 人ゲームへの拡張である。現実世界における意思決定は、一般的には 2 人以上の構成員によって行われるという観点から、ジレンマゲームをより現実的な設定へと拡張した N 人版繰り返し囚人のジレンマゲームに関する研究がなされている [Bonacich 76], [Bankes 94]。これらの研究の多くは、ある特定の集団の規模を設定し、その条件のもとで協調行動が創発するか否かについて議論しているが、現実世界を考えると、集団ははじめからある規模で存在するのではなく、異なった規模の集団が混在する中で、進化の過程においてその規模自体も選択され、環境の変動にともなって拡大縮小を繰り返してきたと考えられ、局所性の進化を考慮した議論は重要であると言える。

以上を踏まえ、本研究はこれまで同一のものとして議論されてきた 2 つの局所性のそれぞれが、戦略集団の進化および協調行動の創発にもたらす影響および局所性の進化を導入した場合における協調行動の創発への影響と局所性の進化のダイナミクスに関して知見を得ることを目的とする。

2. N 人版繰り返し囚人のジレンマゲーム

N 人版繰り返し囚人のジレンマゲーム (N-Person Iterated Prisoner's Dilemma, N-IPD) は、2 人版繰り返し囚人のジレンマゲームのより現実的な拡張として、利己的集団における協調行動の創発をテーマに研究されている。また、石田らはマルチエージェント系における荷物搬送作業のシンプルなモデルとして N-IPD を採用し、エージェントの適切な価値観の進化的獲得について議論しており [石田 99]、工学的な視点からも注目すべきモデルであると言える。本研究では、N 人版繰り返し囚人のジレンマゲームを以下のように定義する (図 1)。

- ゲームの構成員数を n として、各プレイヤーはそれぞれ同時に協調 (C) または裏切り (D) を選択する。
- n 人中の協調者の人数 c に応じて、以下の利得を得る。

$$\text{協調者の利得} \quad RC(c) = c/n \quad (1)$$

$$\text{裏切り者の利得} \quad RD(c) = (c+k)/n \quad (2)$$

k は裏切りへの誘惑の度合いを表す定数 ($1 < k < n$)。

- 以上の対戦を g 回繰り返し行う。

この利得式は、他のプレイヤーが次回も同じ手を維持するならば、自分は裏切ったほうが

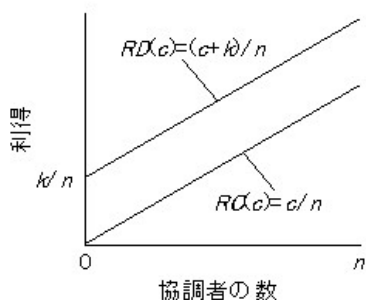


図 1 : N-IPD の利得式

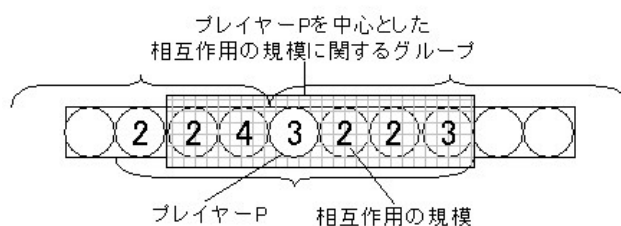


図 2 : 相互作用の規模に関するグループ

高い利得を得ることができる ($RD(c-1) > RC(c)$) が、もし全員が裏切ると、全員が協調するよりも全員にとって悪い結果 ($RD(0) < RC(n)$) を招いてしまう、というジレンマ構造を含んでいる。また、この設定を具体的な状況として表現すると、次のとおりになる。

「 n 人で共有財を利用する。財を最大限に利用するための維持費用としてコスト k が利用人数に関わらず必要となる。そこで、 k を構成人数で均等に配分した k/n をそれぞれが定期的に負担しようと約束するが、実際に各構成員がコストを支払う（協調する）か支払わないか（裏切る）は個人の自由である。ただし、各構成員が共有財から得られるメリットは実際に支払われたコストの総額に比例する。（ただし、利得が 0 より小さくなるのを避けるために、実際にはコストをすべての構成員の利得に上乘せしている。）」

なお、本研究で採用する利得式は、集団の構成員数 n で正規化されているために、構成員数が増加するほど各個体が負担するコストが小さくなる設定となっている。Bonacich らは、このような条件では構成員数が増加するにしたがって、協調関係の創発がとなる可能性があることを指摘している [Bonacich 76]。

3. 空間的局所性の進化を導入した戦略の進化

集団内の各個体は、大きさ N の 1 次元トラス状グリッドに 1 個体ずつ配置される。各個体は、 N -IPD の戦略 s, h 、相互作用の規模 i 、世代交代の規模 r を遺伝的に保持する。また、各個体は、グリッド上での自身からの距離が、相互作用の規模 i （あるいは世代交代の規模 r ）以内である個体を近傍の個体と定義する。ここで、「ある個体を中心としたグループ」を、「中心となる個体の近傍であり、かつ、その個体自身にとっても中心となる個体が近傍である集団」と定義する（図 2）。以後、相互作用の規模 i を用いて定義したグループを相互作用に関するグループ、世代交代の規模 r を用いて定義したグループを世代交代に関するグループと呼ぶ。

各個体は遺伝的に定義された戦略に従い、繰り返しゲームを行う。本研究ではひとつ前の対戦における協調者の割合に応じて、次回の手を決定する戦略を採用する。具体的には 2 つの遺伝子 s ($0 \leq s < 1$ を満たす実数)、 h (0 または 1 の 2 進数) を用いて以下のとおりに定義する。

- 一つ前の対戦での協調者の割合を C として、

$C \leq s$ ならば	協調
それ以外	裏切り
- ただし、繰り返し対戦の初回では、各個体がそれぞれ h (0 ならば裏切り、 1 ならば協調) を出すものとした擬似的な対戦履歴から協調者の割合を算出し、これを用いて初回の手を決定する。

以上のような戦略集団を用いて繰り返し対戦を行う。集団中のすべての個体について、各個体を中心とした相互作用に関するグループを用いて N 人版繰り返し囚人のジレンマゲームをそれぞれ独立に行う。次世代において、各グリッドを占める個体は、そのグリッドに存在する個体を中心とした世代交代に関するグループの中から適応度に比例したルーレット選択によって決定される。その際に各個体を用いる適応度は、各個体がすべての繰り返し対戦で得た平均得点を、その個体が所属する世代交代に関するグループ数で割ったものを採用する。また、選択の際、各個体の持つ遺伝子 s, h, i, r について、それぞれ確率 p_m で定義域においてランダムに値を割り当てなおす突然変異を導入する。以上の操作を繰り返し、集団を進化させる。

4. 進化実験と考察

4.1 固定した局所性と協調者の割合

はじめに、空間的局所性に関する 2 つの要素が集団に与える影響の基本的特性を明らかにするため、相互作用の規模 i と世代交代の規模 r をそれぞれ、世代を通してすべての個体について同一の値に固定して実験を行った。相互作用の規模を i に固定したとき、相互作用に関するグループは、各個体の近傍（半径 i 以内の $2i+1$ 個体）と同等である。また、世代交代の規模を r に固定したとき、各グリッドの次世代の候補は、グリッドを中心とする半径 r 以内の個体から選択され、適応度は平均得点と同値となる。なお、本研究では、繰り返し対戦において、場に出す手が確率 p_n で戦略の意図した手と反転するノイズありのゲームを採用する。パラメータは、 $N=101$, $k=2$, $g=100$, $p_m=0.05$, $p_n=0.1$, 世代数 2000 を用い、初期集団の遺伝子は定義域でランダムに決定するものとした。

図 3 は $i=8$, $r=8$ での実験結果の一例である。ここで戦略 s の平均とは、各世代において集団におけるすべての個体の持つ s を平均したものである。戦略 h の平均とは、すべての個体の持つ h を平均したものである。また、協調者の割合とは、各世代でのすべての繰り返し対戦における協調者の割合の平均である。グラフからわかるとおり、集団は世代を通してある方向へ収束するのではなく、協調戦略と裏切り戦略が混在し、大きく変動する状態が続いた。また、戦略が協調者の割合に及ぼす全体の傾向としては、戦略 s の平均が低いほど、また戦略 h の平均が大きいほど協調者の割合が高いと言える。

図 4 は異なる相互作用の規模 i と世代交代の規模 r を用いてそれぞれ 5 試行を行ったときの、世代を通したすべてのゲームにおける協調者の割合の平均を示したものである。これより、相互作用の規模の増大に伴って協調者の割合は上昇しピークに達し、それ以降は次第に低下していることがわかる。このことは、利得式の特徴や相互作用の規模の差異がもたらす協調成立に関わる種々の要因によるトレードオフの結果であると考えられる。そこで、特に局所性のもたらす要因について検討するために、世代内での各繰り返しゲームにおける協調者の割合の分布に注目し、解析を行った[鈴木 01]。その結果、相互作用の規模の増大は、隣接した相互作用に関するグループ間における協調者の割合の多様性を減少させ、このことが各グループにおいてうまく協調できたかどうかの差が個体にもたらす選択圧を減少させるために、協調行動の創発をもたらし難い方へ働くと考えられることが判明した。また、同図より、協調者の割合のピークは世代交代の規模 r が大きくなるにつれて次第に高くなっていることがわかる。これは、世代交代の規模が小さい場合においては、戦略の局所的な伝播がもたらす多様性が足かせとなり、協調戦略が集団全体を支配しきれないことに起因することが判明した。

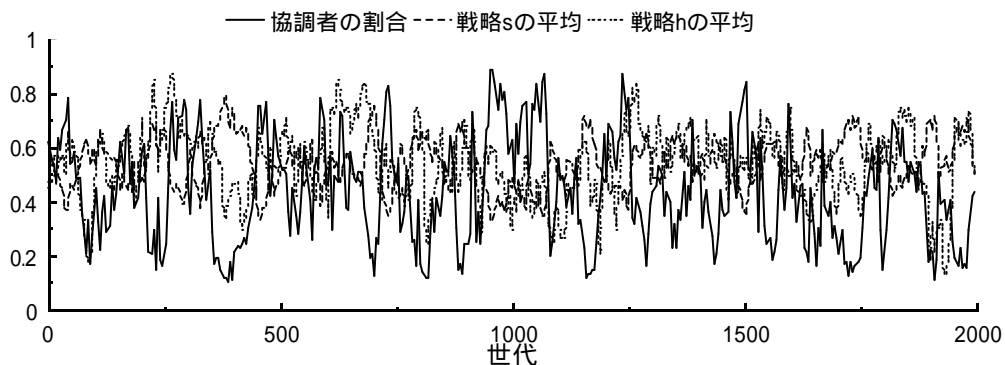


図 3: $i=8$, $r=8$ の場合での戦略の進化

4.2 相互作用の規模の進化

次に、相互作用の規模 i の進化を導入して実験を行った。具体的には、前述のとおり、各個体が遺伝的に保持する相互作用の規模 i に従って相互作用に関するグループを生成し、繰り返し対戦を行うものとした。このとき、相互作用の規模 i も戦略と同時に選択圧を受けるため、相互作用に関するグループの大きさとその構成員は世代を通して大きく変動する。図 5 は異なる世代交代の規模を用いた場合での世代を通したすべてのゲームにおける協調者の割合の平均を表したものである。なお、比較のために、図 4 の進化なしの場合での各世代交代の規模 r について、協調者の割合の最も高かった値を同時に示している。ここで注目すべき点は、世代交代の規模 r が小さい場合において、相互作用の規模の進化なしの場合と比較して、進化ありの場合の方が協調者の割合が高いことである。

図 6 は、世代交代の規模 $r=2$ 、相互作用の規模は進化ありの条件である試行について、世代を通した相互作用に関するグループの規模の平均と、協調者の割合の平均の相関を軌跡として示したものである。グループの規模の平均とは、各世代において、実際に繰り返し対戦のために形成された相互作用に関するグループの構成員数の平均である。進化ありの場合では相互作用に関するグループの規模が大きいほど、協調者の割合が明らかに高い傾向があることがわかる。これは、図 4 において、進化なしの場合では相互作用の規模が大きいほど協調者の割合が低いという結果と矛盾する。

このような結果となるのは次のような進化のシナリオによるものであると考えられる。まず、協調関係が比較的構築されやすい小規模なグループにおいて、協調関係が局所的に形成される。協調的な集団を前提とすると、グループが大きいほど一人当たりにかかるコストが低いために、より大規模なグループを形成する個体、つまり相互作用の規模の大きな個体が集団中に広まっていき、全体として協調的な集団が形成される。この相互作用の規模の拡大が、世代交代の規模が小さい場合において多様な戦略が集団を占めることによる協調者の割合の低下を補うようにして、個体の適応度を高い平均得点の方へと平均化する。しかし、集団が過度に大きくなると、相互作用の規模の小さい裏切り戦略による侵入を容易に受けるため、裏切り集団へと進化する。以上のような、相互作用の規模の拡大を含んだサイクルを繰り返すことで、進化なしの場合に比べ全体として高い協調者の割合をもたらしていると考えられる。

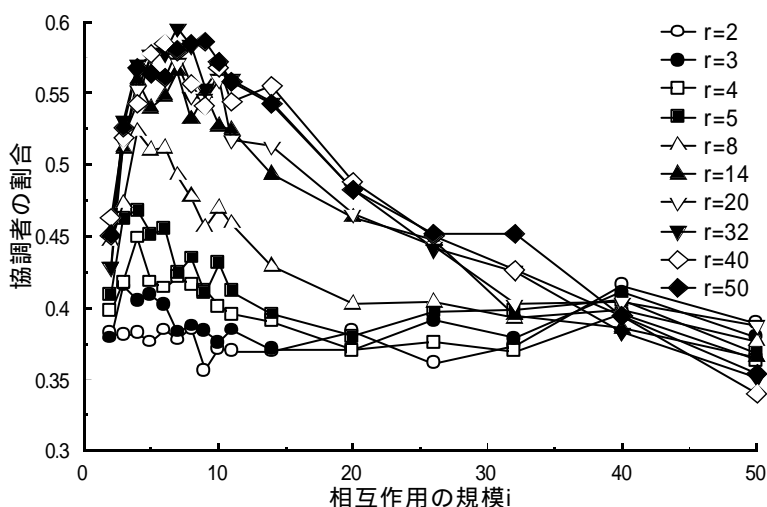


図 4：異なる相互作用の規模 i 、世代交代の規模 r での協調者の割合

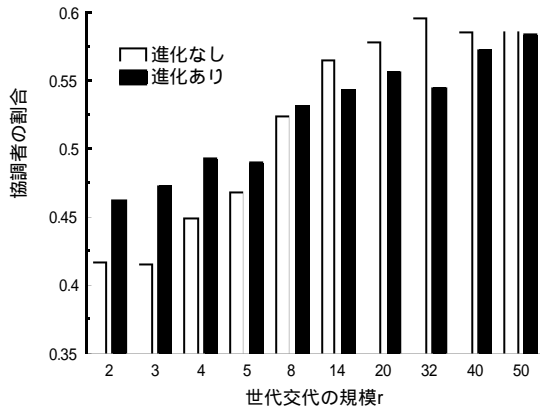


図 5：相互作用の規模の進化

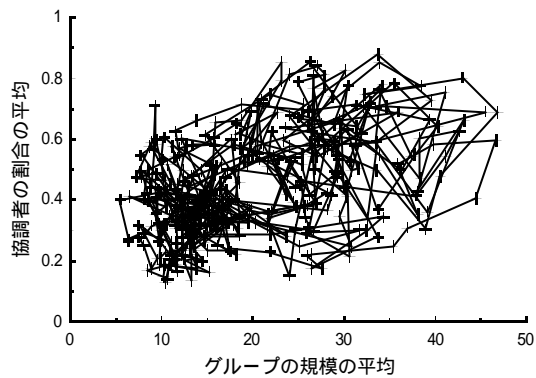


図 6：協調者の割合とグループの規模

5. おわりに

本研究では、利己的集団における協調行動の創発に関して、空間的局所性の与える影響について知見を得るために、空間的局所性とその進化を導入した N 人版繰り返し囚人のジレンマゲームにおける戦略の進化モデルを構築し、進化実験を行った。

従来同一のものとして議論されていた、相互作用に関する局所性と、世代交代に関する局所性を個別のパラメータとして進化実験を行ったところ、本モデルでは、相互作用の規模の増大に伴って協調者の割合にピークが存在し、世代交代の規模が大きいほど協調集団への進化に有利であることが判明した。さらに、各個体が相互作用の規模を遺伝子として保持する設定を用いて実験を行ったところ、世代交代の規模が小さい場合において、相互作用の規模の動的な進化により、進化なしの場合と比較して高い協調者の割合をもたらすことが確認された。この結果から得られる工学的な知見として、マルチエージェント系における協調作業システムの進化的獲得において、個々のエージェントの戦略の進化だけでなく、各エージェントが他のエージェントと相互作用を行う範囲をも動的に進化させる（もしくは戦略に含める）ことが、協調行動の創発につながる可能性があるということが挙げられる。

今後は、実験結果についての解析をさらに進めるとともに、世代交代の規模の進化を導入した条件での実験を進める予定である。

参考文献

- [Arita 00] Arita T., Suzuki R.: Interactions between Learning and Evolution: The Outstanding Strategy Generated by the Baldwin Effect, Proceedings of Artificial Life VII, pp. 196-205, 2000.
- [Banks 94] Banks, T.: Exploring the Foundations of Artificial Societies: Experiments in Evolving Solutions to Iterated N-player Prisoner's Dilemma, Proceedings of the Fourth International Conference on Artificial Life, pp. 337-342, 1994.
- [Bonacich 76] Bonacich, P., Shure, G. H., Kahan, J. P. and Meeker, R. J.: Cooperation and Group Size in the N-Person Prisoners' Dilemma, Journal of Conflict Resolution, Vol. 20, No. 4, pp. 687-706, 1976.
- [Grim 96] Grim, P.: Spatialization and Greater Generosity in the Stochastic Prisoner's Dilemma, Bio Systems, Vol. 37, pp. 3-17, 1996.
- [石田 99] 石田崇, 長井隆, 横井浩史, 嘉数侑昇: 競争社会系における相互作用を用いた意志決定システムの構築, 第 11 回自律分散システムシンポジウム 資料, pp. 263-266, 1999.
- [Suzuki 00] Suzuki, R. and Arita, T.: Interaction between Evolution and Learning in a Population of Globally or Locally Interacting Agents, Proceedings of the Seventh International Conference on Neural Information Processing, pp. 738-743, 2000.
- [鈴木 01] 鈴木麗壘, 有田隆也: N 人版繰り返し囚人のジレンマゲームにおける空間的局所性の影響とその進化, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 101, No.66, pp. 39-45, 2001.