

# 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進化

## Evolution of Spatial Locality in the N-Person Iterated Prisoner's Dilemma

鈴木麗璽  
Reiji SUZUKI

有田隆也  
Takaya ARITA

名古屋大学 大学院人間情報学研究所  
Graduate School of Human Informatics Nagoya University

Our purpose is to consider the dynamics of the evolution of spatial locality in the N-Person Iterated Prisoner's Dilemma by focusing on two essential factors: the scale of interaction (which decides the neighboring members playing the N-Person games) and the scale of reproduction (which decides the neighboring candidates occupying each cell in the next generation). We showed that the proportion of cooperators is dominated by various settings of these two factors in the preliminary experiment of the evolution of strategies for one-dimensional N-IPD. Subsequently we introduced the evolution of the scale of interaction into our model. The result shows that the dynamic evolution of the scale of interaction could facilitate the emergence of the global cooperation when the scale of reproduction was relatively small.

### 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 (IPD) を用いた研究が多くなされてきたが、より現実的な設定として、空間的局所性を導入した戦略の進化実験が行われている [Grim 96][Suzuki 00]. しかし、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 つの本質的な要素、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。

一方、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 (N-IPD) に関する研究がなされている [Bonacich 76][Banks 94]. これらの研究の多くは、ある特定の規模の集団を設定し、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にも選択圧がかかり、環境の変動にもなって拡大縮小を繰り返してきたと考えられる。

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して、空間的局所性の進化を導入した N-IPD における戦略の進化モデルを構築し、実験を行った。

### 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研究されている。本研究では、N-IPD を以下のように定義する。

- 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。  

協調者の利得	$RC(c) = c/n$	(1)
裏切り者の利得	$RD(c) = (c+k)/n$	(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  $g$  回繰り返す。

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。

### 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認識する。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、その個体自身も中心となる個体を近傍であると認識している集団」と定義する。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。

各個体は遺伝的に決定された戦略に従い、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 つのパラメータ  $s$  ( $0 \leq s < 1$  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定義する。

- ひとつ前の対戦での協調者の割合を  $C$  として、  

$C \geq s$ 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。その際に各個体が用いる適応度は、各個体がすべて

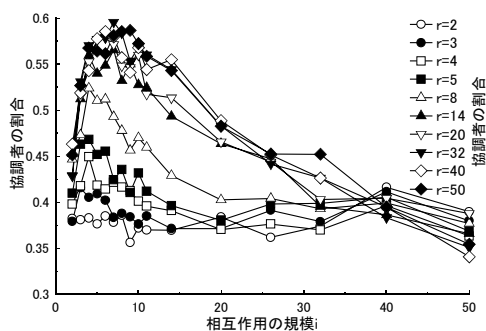


図 1 : 異なる  $i, r$  での協調者の割合

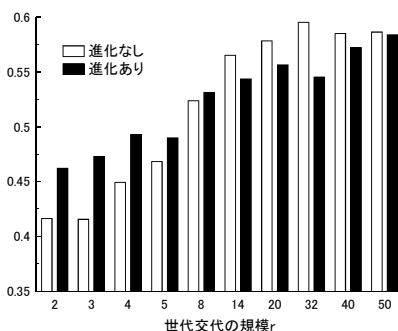


図 2 : 相互作用の規模の進化

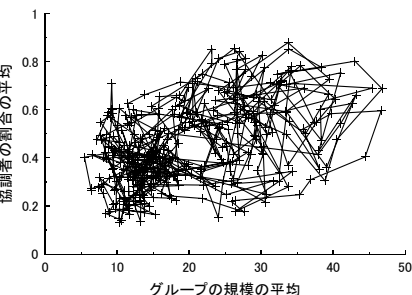


図 3 : 協調者の割合とグループの規模

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

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を用いて実験を行った。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 1 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。これは、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素のトレードオフの結果であると考えられる。また、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の差異がもたらす戦略の多様性と関わりがあると推測される。

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、前節で示したとおり、各個体が遺伝的に保持する相互作用の規模  $i$  に従ってグループ形成を行うものとした。図 2 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 1 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、 $r$  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 3 は、 $r=2$ , 進化ありの条件でのある試行について、世代を通したグループの規模の平均と、協調者の割合の平均の推移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グループの構成員数の平均である。進化ありの場合ではグループの規模が大きいほど、協調者の割合が高い傾向があることがわかる。これは、図 1 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と推測される。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。

#### 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。

#### 参考文献

- [Grim 96] Grim, P.: Spatialization and Greater Generosity in the Stochastic Prisoner's Dilemma, *Bio Systems*, Vol. 37, pp. 3-17, 1996.
- [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.
- [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.
- [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.