

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

鈴木麗璽 有田隆也

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, 3503
{reiji, ari}@info.human.nagoya-u.ac.jp

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(N-IPD)の戦略の進化モデルを構築した。N-IPD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と世代交代の規模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て実験を行った。本稿では、2つの局所性が協調行動の創発に与える基本的特性について解析を行う。また相互作用の規模の進化を導入した場合、導入しない場合と比べ高い協調の比率をもたらせたことなどについて示す。

N人版繰り返し囚人のジレンマゲーム、空間的局所性、協調行動の進化、人工生命。

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

Reiji SUZUKI Takaya ARITA

Graduate School of Human Informatics Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601
+81-52-789-4235, 3503
{reiji, ari}@info.human.nagoya-u.ac.jp

The purpose of this paper 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 conducted the evolutionary experiment of the evolution of strategies for one-dimensional N-IPD with/without the evolution of these two factors. The result has shown 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.

N-Person Iterated Prisoner's Dilemma, evolution of cooperation, spatial locality, artificial life.

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を用いた研究が Axelrod をはじめとして多くなされてきた[Axelrod 84]. 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、表現型の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報告してきた[Arita 00].

このような動的要因が個体間の相互作用に依存した環境においては、その相互作用の表現が集団全体の挙動を大きく左右する。ジレンマゲームにおける戦略の進化実験に関する研究の多くは、集団内の各個体が他のすべての個体と対戦を行う、総当たり戦の設定を用いてきた。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、前述の表現型の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の可塑性の影響が異なることを示した[Suzuki 00].

しかし、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つを区別した議論は、局所性が集団の進化に与える影響について本質的であるにもかかわらず、十分な議論がなされていなかった。石淵らは、空間型繰り返し囚人のジレンマゲームにおいて、これら2つの要素が協調集団への進化に与える影響について解析した。彼らはノイズ率が協調集団への進化に与える影響に注目し、ノイズ率が中程度の場合において、相互作用の規模、世代交代の規模どちらも大きくなるほど協調集団への進化が難しくなることを示した[石淵 00].

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、環境の変動にと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おり、一般にはゲームを行う構成員の数が多ほど協調関係が築かれにくいという特徴があるとされている。これは2人版ゲームと比較した場合、裏切り者のみを直接罰する手段がないためであるとされている。しかし、Bonacich らは集団の構成員の数の増加に伴う利得式の変化に基づいてジレンマゲームを分類し、ある条件においては構成員の増加と共に協調関係が築かれることを実際に大学生を対象とした実験を用いて示している[Bonacich 76]. また、Banks は、協調行動の進化にとって、ゲームの構成員の数よりも、むしろ利得式において協調することが全員裏切るよりもよい結果となる最小の構成員数を決めるパラメータが重要であることを進化実験に基づいて指摘している[Banks 94]. 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。

- 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。

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

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

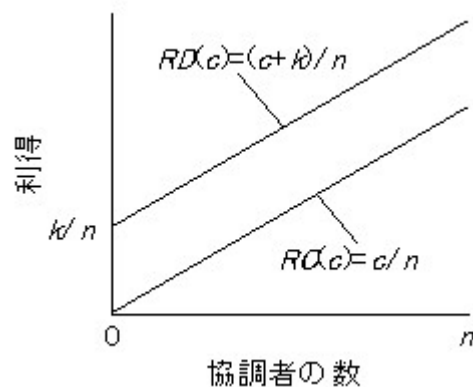


図1: N-IPDの利得式

k は裏切りへの誘惑の度合いを表す定数 ($l < k < n$) .

- 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 ($RD(c-l) > RC(c)$) 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。この状況を具体的に表現すると次のとおりになる。

h 人で共有財を利用するが、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 kn をそれぞれが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。

Bonacich らは、利得式から計算可能な、協調することのメリットと裏切りへの誘惑が、集団の構成員数の増加に伴ってどのように変化するかによって利得式を 5 種類に分類している。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協調者のメリットは増加し、裏切りへの誘惑は減少するタイプに属する。彼らは、このタイプに属する利得式では構成員の増加に伴い協調行動がより成立しやすくなる可能性があることを指摘している。

3. 空間的局所性の進化を導入した戦略の進化

空間的局所性が協調集団の進化に与える影響を解析するため、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た。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。

3.1 空間的局所性の導入

集団中の各個体は、図 2 に示すように、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。

Seo らは N -IPD を行う戦略個体を 1 次元グリッド上に配置し、対戦相手の選択の際に空間的局所性を導入し

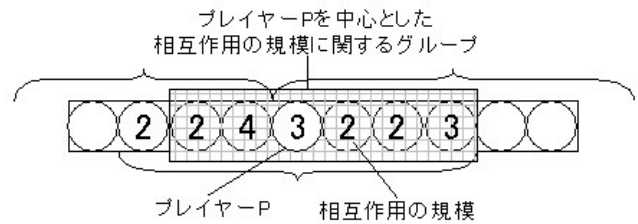


図 2：相互作用の規模に関するグループ

た進化実験を行った[Seo 99]。ただし、彼らの用いた近傍の大きさは、ある固定された構成員数でのゲームにおいて、そのメンバを局所的に選択する際の範囲を決定するものであり、本研究のように相互作用の規模がグループの大きさ自体に直接影響するものとは異なる。

3.2 戦略の遺伝子表現

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 (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、
 $C \geq s$ 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。

このようにして定義される戦略は、 N -IPD におけるしっぺ返し戦略とみなすことができ、 s が小さいほど、また h が大きいほど協調的な戦略であると言える。

3.3 繰り返し対戦と進化

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 協調集団の進化への空間的局所性の影響

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.この設定では,集団中のすべての個体が $2i+1$ 回の繰り返し対戦を行う.また,各個体はすべて $2r+1$ 回のルーレット選択に参加するため,世代交代は各グリッドについて半径 r 以内の個体から繰り返し対戦での平均得点に比例したルーレット選択を行った場合と同等である.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_m 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した.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.以後,特に断りの無い限り上記のパラメータを標準のものとして用いる.

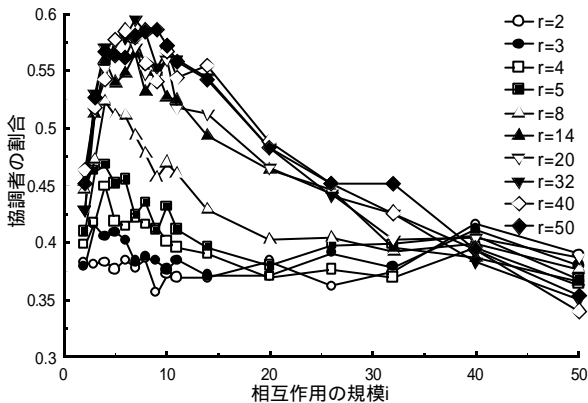


図4: 異なる i, r での協調者の割合

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.また,世代交代の規模の増大に伴ってピークは高くなる傾向があることがわかる.

はじめに,相互作用の規模 i が協調行動の進化に与える影響について考察する.図4のような協調者の割合のピークが生じるのは,前述の利得式の特徴を含めた協調成立に関する様々な要因のもたらすトレードオフの結果であると考えられるが,本稿では特に,相互作用の規模の増大に伴う,協調者の割合のグループ間での多様性に注目する.図5,6はそれぞれ $i=8, r=2, 32$ の時の,ある試行での初期200世代における,各グリッド上の個体を中心とした相互作用に関するグループによる繰り返し対戦での協調者の割合を,濃淡(黒: 0.0, 白: 1.0)によって示したものである.同図より,相互作用の規模が大きい場合,近接するグループ間における協調者の割合の多様性が小さくなっていることがわかる.これは,相互作用の規模が大きいほどグループの構成員数が増加し,近隣のグループにおいて構成員が重複して含まれるようになり,対戦結果が類似するためであると

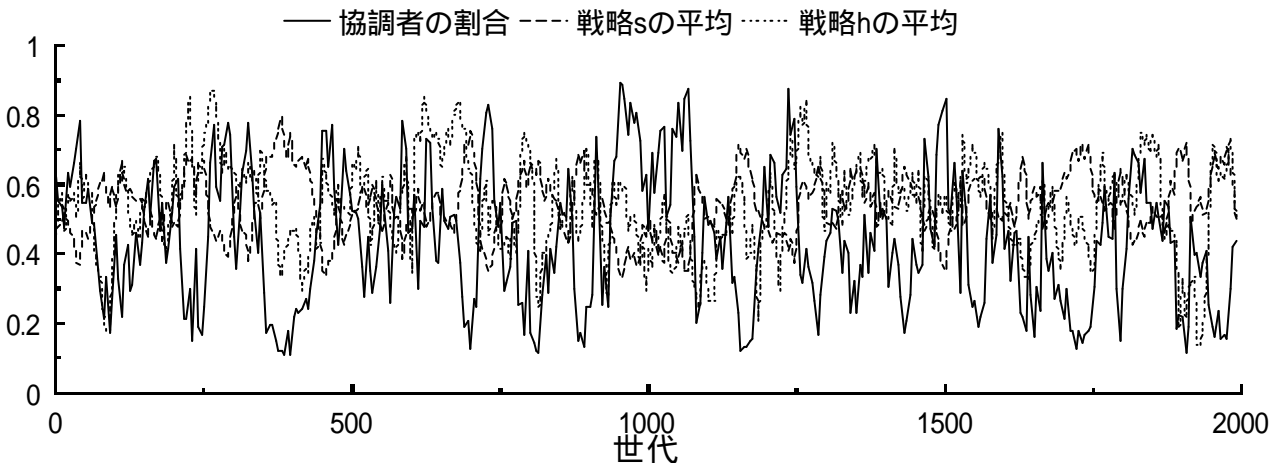


図3: $i=8, r=8$ の場合での戦略の進化

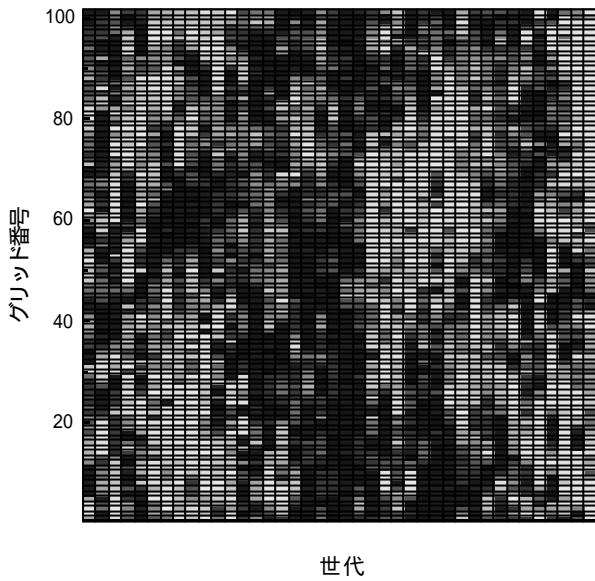


図 5 : $i=2, r=8$ の場合での協調者の割合の分布

考えられる。各個体の得る適応度は協調者の割合に大きく依存するため、多様性の減少は近傍の個体間の適応度差の減少をもたらす。相互作用の規模の増大に伴う協調者の割合の減少は、この適応度差の減少によって選択圧が働きにくくなっていることが要因の一つとなっていると推測することができる。これに加え、前述の利得式の特徴により、図 4 のようなピークが生じていると捉えることができる。

次に、世代交代の規模が集団の進化に与える影響について考察する。世代交代の規模が大きくなるに従って全体的に協調者の割合が高くなる要因として、世代交代の規模が集団における戦略の多様性に与える影響に注目する。このモデルでは、世代交代の規模が大きいくほど、あるサイトから離れた個体が選択される可能性が高くなる。このため、集団において適応度の高い戦略が出現した場合に、その戦略が他のサイトへ次々と伝播していく可能性は r が大きいほど高く、集団の構成は均一な方向へと進化する傾向があると言える。図 7, 8 はそれぞれ $i=8, r=2, 32$ の時の、ある試行での初期 200 世代における各グリッド上の個体を中心とした相互作用に関するグループでの協調者の割合の分布を示したものである。同図より、 $r=32$ の場合は全体として戦略が均一であるのと比較して、 $r=2$ の場合は協調者の割合に局所的な差異があり、多様な戦略個体が混在していることがわかる。

また、表 1 は、ある試行における世代ごとの各サイト上の個体を中心とした相互作用に関するグループでの協調者の割合の標準偏差と、世代内における協調者の割合平均の世代間での標準偏差を $r=2, 32$ の場合で比較したものである。前者は世代内での戦略の多様性を、後者は世代間での戦略の多様性をあらわす指標と

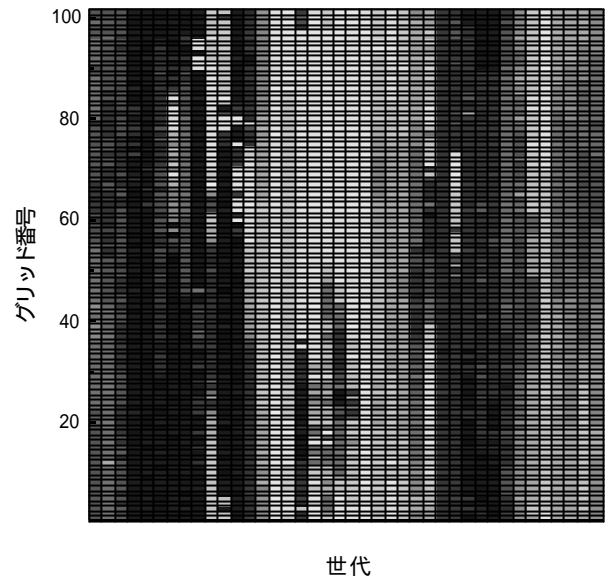


図 6 : $i=32, r=8$ の場合で協調者の割合の分布

捉えることができる。これより、 r の値が小さい場合、世代内の多様性は大きく、集団には多種の戦略が存在するが、世代間で比較すると大きな変化は比較的小さいことがわかる。逆に、 r の値が大きい場合、集団は単一の戦略で占められるが、その戦略は世代間ではより動的に変化していることが分かる。この性質が協調集団の進化に与える影響は、モデルの特徴に依存するところが大きい。が、本実験においては、 r が小さい場合は、この多様性が協調的な戦略が集団全体に広まるのを妨げる方向へ働くために、平均すると協調者の割合が低い結果となり、逆に、 r が大きい場合には、より適応的な戦略が集団全体にすばやく広まることができるために、結果として高い協調者の割合がもたらされたと考えられる。

表 1: 多様性と世代交代の規模

	$r=2$	$r=32$
世代内の多様性	0.28	0.21
世代間の多様性	0.13	0.18

4.2 相互作用の規模の進化

次に、相互作用の規模の進化を導入して実験を行った。具体的には、3.1 節で示したとおりに、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 9 は $r=2, 8, 14, 20, 26, 32, 38, 50$ の場合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、協調者の割合が最も高かったときの値を同時に示している。

この場合においても、前節の結果と同様、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。こ

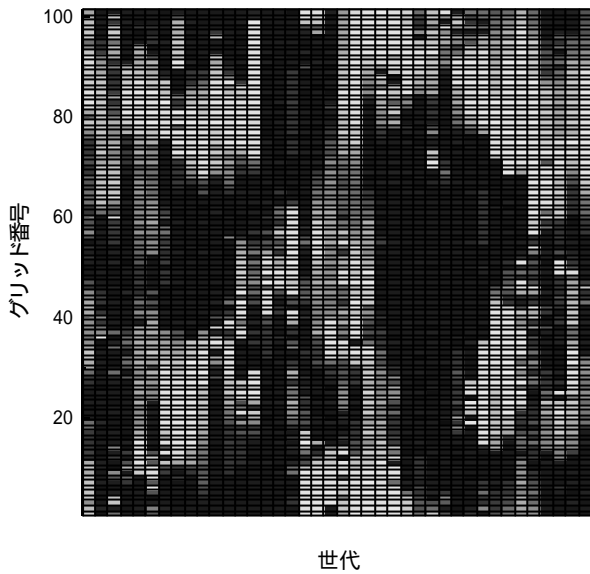


図 7 : $i=8, r=2$ の場合での協調者の割合の分布

ここで注目すべき点は、相互作用の規模が、前節において協調者の割合のピークを示した値に収束するのではなく、世代を通して大きく振動を繰り返したこと、また、世代交代の規模が小さい場合において、相互作用の規模の進化なしの場合と比較して、明らかに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 10 は、相互作用の規模の進化あり、 $r=2$ 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 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

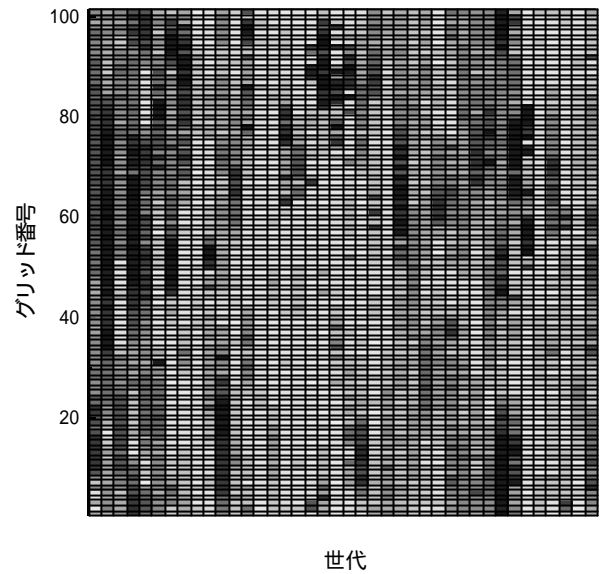


図 8 : $i=8, r=32$ の場合での協調者の割合の分布

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、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関係の創発にピークが存在し、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。

今後は、実験結果についてさらに解析を進めるとともに、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 .
- [Axelrod 84] Axelrod R.: The Evolution of Cooperation, Basic Books, 1984.

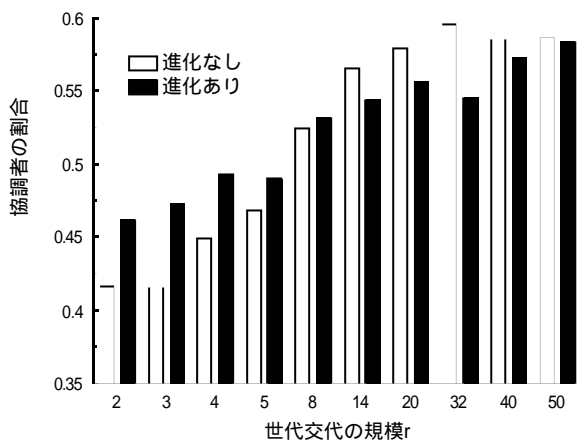


図 9 : 相互作用の規模の進化

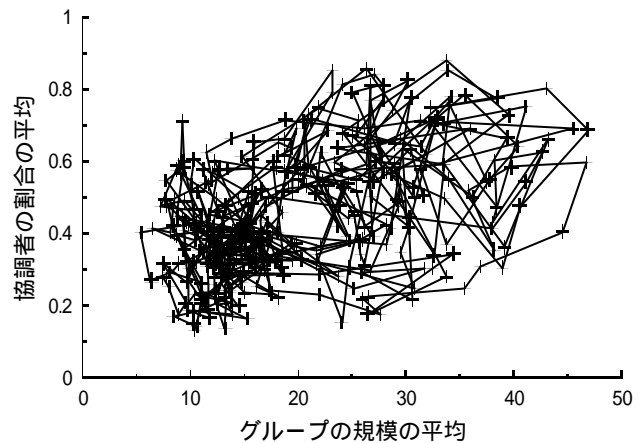


図 10 : 協調者の割合とグループの規模

- [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.
- [石淵 00] 石淵久生, 中理達生, 中島智晴: 空間型繰返し囚人のジレンマゲームにおける隣接プレイヤー間での信頼関係のモデル化, 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J83-D-I, No. 10, pp.1097-1108, 2000.
- [Seo 99] Seo, Y. -G., Cho, S. -B. and Yao, X.: Emergence of Cooperative Coalition in NIPD Game with Localization of Interaction and Learning, Proc. of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, Vol. 2 pp. 877-884, 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.