

進化と学習の相互作用に対する空間的局所性の影響

The Effect of the Spatial Locality on the Baldwin Effect

鈴木 麗壘
Reiji Suzuki

名古屋大学 大学院人間情報学研究科
Graduate School of Human Informatics, Nagoya University
reiji@info.human.nagoya-u.ac.jp, <http://www2.create.human.nagoya-u.ac.jp/~reiji/>

有田 隆也
Takaya Arita

(同上)
ari@info.human.nagoya-u.ac.jp, <http://www2.create.human.nagoya-u.ac.jp/~ari/>

keywords: Baldwin effect, spatial locality, evolution of the phenotypic plasticity, iterated prisoner's dilemma, artificial life.

Summary

The Baldwin effect is known as one of interactions between learning and evolution, which suggests that individual lifetime learning can influence the course of evolution without the Lamarckian mechanism. Since Hinton and Nowlan clearly demonstrated this effect by a simple evolutionary simulation, this effect has come to the attention not only of biologists but also of the computer scientists. The purpose of this paper is to clarify the effects of the spatial locality on the evolution of the phenotypic plasticity and the emergence of cooperative behavior in dynamic environments. We adopted a two-dimensional model of the evolution of strategies for Iterated Prisoner's Dilemma (IPD) as a dynamic environment, introduced phenotypic plasticity into strategies, and conducted computational experiments with various settings of two essential factors, one of which concerns the scale of interaction (which decides the neighboring members playing IPD), and another concerns the scale of reproduction (which decides the neighboring candidates occupying each grid in the next generation). In almost all experiments the necessary and sufficient amount of phenotypic plasticity was selected then the population finally established cooperation through the Baldwin effect, but the evolution of the phenotypic plasticity was heavily affected by the settings of these two parameters especially when both of them are small.

1. はじめに

進化と学習は生物における代表的な適応プロセスである。その両者がいかに影響しあっているかという問題は100年以上前に端を発する生物学的問題である。近年、この問題は進化論的計算、あるいは人工生命の研究領域の主要テーマの一つになってきた。その理由は、進化論的計算手法を用いた計算機実験により新たな生物学的知見を得る可能性があること、および、進化と学習の両者をうまく融合させる新たな工学的知見を得る可能性があるためである。

そのような情報科学的な観点からの研究における主要なトピックに Baldwin 効果がある [Baldwin 96]。これは、ラマルク主義的な獲得形質の遺伝の仕組みがなくても、集団における個体の学習が集団全体の進化に方向性を与えるというものである。Hinton と Nowlan による先駆的研究 [Hinton 87] 以来、数多くの研究が行われた中で、鈴木らは、動的な環境、特に、動的な要因を集団自体が内包している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 (Iterated Prisoner's Dilemma, IPD) の戦略の進化モデルを構築し、Baldwin 効果によって協調集団への進化が促進されることを報告してきた [鈴木 00, Arita 00]。

一方、生態系や人間社会のモデル化、あるいは工学的応用を目的とする場合、現実世界の物理的制約を考慮すると、個体間の関係が全く同一であるという条件を緩め、モデルに局所的な相互作用を導入することは本質的であると考えられる。囚人のジレンマゲームの研究においても、多くの研究がその拡張を試みており、局所性の導入によって異なる進化ダイナミクスが観察されることが明らかになってきている。特に、生物学的見地から、空間的な局所性を制約条件として導入した研究が多くなされている。Nowak らは、2次元平面に配置された2種類の単純な戦略 (常に裏切り、常に協調) が近傍の個体とジレンマゲームを行い、決定論的に進化するモデルにおいて、2種の戦略が混在しカオス的なパターンを生み出すゲームの利得行列が存在することを示した [Nowak 92]。また、

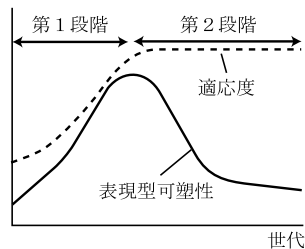


図 1 Baldwin 効果

Grim は、平面上に配置された混合戦略が近傍とのみゲームを行う設定を用いて進化実験を行い、局所性の全く無い条件と比較してより協調的なしっぺ返し戦略 [Axelrod 84] が集団を支配可能であることを示した [Grim 96]。進化と学習の相互作用においても、局所性の導入によって、そのダイナミクスが受ける影響を明らかにすることは検討すべき課題であると考えられる。

そこで、我々は、鈴木らの表現型可塑性の進化モデルに空間的局所性を導入し、表現型可塑性の進化および協調行動の創発に与える影響について知見を得ることを目的とする [Suzuki 00]。その際、本研究では、従来、空間的局所性に関して区別されてこなかった 2 つの要素である、個体間の相互作用に関わる局所性と、世代交代に関わる局所性を区別したモデルを構築し、それぞれが可塑性の進化ダイナミクスにどのような影響を与えるかについて明らかにする。この手法および実験結果は、進化ダイナミクスに対する局所性の影響を対象とする研究全般に知見を与える可能性がある。

2. 動的環境における Baldwin 効果

Baldwin 効果とは、進化と学習が相互に与える影響を、学習のメリットとコストのバランスから説明するものであり、一般には、次の 2 つの段階を経て、学習により獲得されていた形質が次第に生得的な形質へと進化していくものとされている [Turney 96]。

第 1 段階 学習により生存上有利な形質を獲得した個体が次世代に多く子孫を残す。

第 2 段階 十分多くの個体が生存上有利な形質を学習により獲得した集団では、学習にかかるコストのためその形質を生得的に獲得している個体が次世代に多く子孫を残す。

ここで、学習の本質は個体の生涯における表現型の可塑性な変化であるとする、2 つの段階を経て、典型的には図 1 のような適応度と表現型可塑性のカーブを描くと考えられる。

Hinton らによる先駆的な計算機実験 [Hinton 87] によりこの効果が明確化されて以来、世代を通して最適解が固定された静的な環境を前提として多くの研究がなされてきたが、最近、動的な環境における進化と学習の相互

作用および Baldwin 効果が注目されている。

佐々木らは、ニューラルネットワークを用いて学習する個体が、世代を通して変化する食べ物または毒を表すビット列の入力を正しく識別するようにニューロンの結合重みを学習し、適応度に応じて進化するというシミュレーションを行った [Sasaki 99]。その結果、ダーウィン型の進化システムでは学習を前提として次第に動的環境自体に適応していったと報告している。また、山崎らは、変数の入力に対する正しい出力をニューラルネットワークによって学習する個体群を、ダーウィン型またはラマルク型のシステムを用いて進化させ、学習すべき関数を動的に変化させた場合における双方のシステムの挙動について解析した [Yamasaki 00]。このとき、変動の幅が小さく連続的な環境においては、ダーウィン型よりもラマルク型の進化システムの方がよい結果となることを示した。これらの研究は動的要因が外部から与えられる環境における学習の重要性を示したものである。

一方、鈴木らは、動的要因を集団自体が内包する環境として、IPD における戦略の進化を採用した [鈴木 00]。これは、各個体の適応度が個体間の相互作用によって決定され、世代を通して最適解が存在しない動的環境と言える。彼らは IPD の戦略を表現型とする遺伝子に加え、その表現型が可塑性であるかどうか（対戦結果に応じて表現型を変更するかどうか）を表す遺伝子を保持する戦略個体群を集団として総当たり戦を行い、平均得点に比例したルーレット選択に基づいて集団を進化させた。その結果、次のような形で Baldwin 効果が確認された。

初期世代から数十世代までは、裏切りの戦略が集団中を占め、平均得点が低下した。次に、集団全体での可塑性な表現型の頻度の増加とともに平均得点は上昇し、高い平均得点をもたらす協調的な集団へと進化した。これは、可塑性が裏切りの集団から協調的な集団へのシフトに有利な方向へと働いたことを示しており、Baldwin 効果の第 1 段階であると言える。その後、高い平均得点を維持したまま、可塑性な表現型の頻度は次第に中程度まで低下し、集団の大部分をメタ・パブロフ [x00x] 型と表される個体が占める結果となった。これは、協調関係が十分築かれた集団においては、ノイズによって可塑性がコストとして働くため、協調集団を維持するために最低限必要な可塑性のみが選択されたことを示しており、Baldwin 効果の第 2 段階であると言える。

鈴木らの研究では、相互作用は総当たり戦によって表されたが、個体間の相互作用自体が環境を動的にする要因であることを考えると、局所性による相互作用の制約によって、集団の進化ダイナミクスは大きな影響を受けうると考えられる。そこで、本論文では、局所性の影響を詳細に解析するために、相互作用および世代交代に関する 2 つの局所性を導入し、両者を個別に設定して実験を行う。なお、石淵らは、IPD を行う戦略個体を 2 次元平面上に配置し、近傍の個体のみでゲームおよび世代交

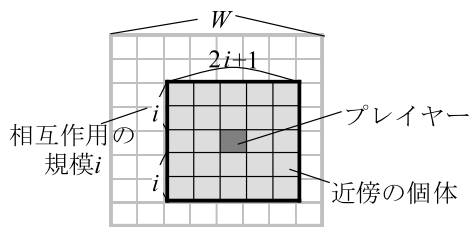


図 2 個体の近傍

代を行う局所性を導入し、進化実験を行った。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、2つの局所性どちらも低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]。本研究においても、2つの局所性の度合いに応じて、進化の過程は大きな影響を受ける可能性があると考えられる。

3. モデル

本研究では、表現型可塑性を導入した IPD における戦略の進化モデル [鈴木 00] を 2次元平面上に拡張し、相互作用および世代交代に関する局所性を導入する。

3.1 集団の構成と局所性

集団における個体を、 $W \times W$ の 2次元のトーラス状グリッドに一体ずつ配置する。各個体は、表 1 によって定義される繰り返し囚人のジレンマゲームにおける戦略を遺伝的に保持し、近傍の個体と対戦を行う。本モデルでは、相互作用の規模 i と世代交代の規模 r という 2つの環境パラメータを用いて、相互作用および世代交代に関する局所性を表現する。図 2 に示すように、各個体は相互作用の規模 i ($1 \leq i \leq (W-1)/2$) によって定義される $(2i+1)^2 - 1$ 個体を近傍の個体とみなし、すべての近傍の個体と表 1 で表される利得行列を用いて行う。世代交代は、各グリッドについて世代交代の規模 r ($1 \leq r \leq (W-1)/2$) によって、 i と同様に定義される近傍のエージェントの中から、対戦で得た平均得点に比例したルーレット選択によって行われる。これらの 2つのパラメータ i, r の値が小さいほど局所性は高く、大きいほど局所性は低くなる。また、両者とも最大 ($i, r = (W-1)/2$) の場合は、総当たり戦を行った場合と同等である。

3.2 戦略の遺伝子表現

各個体の持つ戦略を戦略遺伝子列 GS と可塑性遺伝子列 GP の 2つの遺伝子列の組で表現する。戦略遺伝子列は Lindgren のモデル [Lindgren 91] と同様な、履歴に依存して次回の手を決定する戦略を定義する。記憶長 m の戦略は裏切りを 0、協調を 1 として以下のような 2進数で表された履歴 h_m を持つ。

$$h_m = (a_{m-1}, \dots, a_1, a_0)_2 \quad (1)$$

表 1 囚人のジレンマゲームの利得行列

相手の手	協調 (C)	裏切り (D)
自分の手		
協調 (C)	(R:3, R:3)	(S:0, T:5)
裏切り (D)	(T:5, S:0)	(P:1, P:1)

(自分の得点, 相手の得点)

ただし $T > R > P > S, 2R > T + S$

ここで a_0 は前回の相手の手, a_1 は前回の自分の手, a_2 は前々回の相手の手...とする。

ある履歴 k に対応して次回出すべき手を A_k (0 または 1) とすると、記憶長 m の戦略は、

$$GS = [A_0 A_1 \dots A_{n-1}] \quad (n = 2^m) \quad (2)$$

と表すことができる。これを戦略遺伝子列とする。さらに、各 A_x に対してその表現型 (協調または裏切り) が可塑性を持つかどうかを P_x (0:可塑性を持たない, 1:可塑性を持つ) として、可塑性遺伝子列を

$$GP = [P_0 P_1 \dots P_{n-1}] \quad (3)$$

と定義する。例えば、しつぺ返し戦略 (初回は協調, 以降は前回相手が出した手を真似る) [Axelrod 84] を記憶長 2 で表すと、 $GS = [0101]$, $GP = [0000]$ となる。なお、今回の実験においては、 GS, GP 共に 4 ビットで表現される記憶長 2 の戦略のみを用いる。

3.3 メタ・パブプロフ学習

可塑性を持つ表現型は、対戦中にその表現型を用いた結果に応じて、学習により変更される。ここで、表 2 に示すメタ・パブプロフ学習行列を定義し、これに基づいて表現型を変更するという学習を導入する。この行列の値は、ゲームを行った結果得られる得点が相対的に高ければそのまま変更せず、逆に小さければ変更するという強化学習の原理に基づくものであり、学習則としてシンプルかつ典型的なものとして今回採用する。なお、戦略の進化モデル [鈴木 00] においてさらに学習則自体も進化させた実験結果 [Arita 00] は、この学習則の普遍性を支持するものとなっている。

メタ・パブプロフ学習行列を用いた手の決定は以下の手順で行う。

- 繰り返し対戦を行う前は、各個体は GS の表す戦略をそのまま表現型として持つ。

表 2 メタ・パブプロフ学習行列

相手の手	協調 (C)	裏切り (D)
自分の手		
協調 (C)	C	D
裏切り (D)	D	C

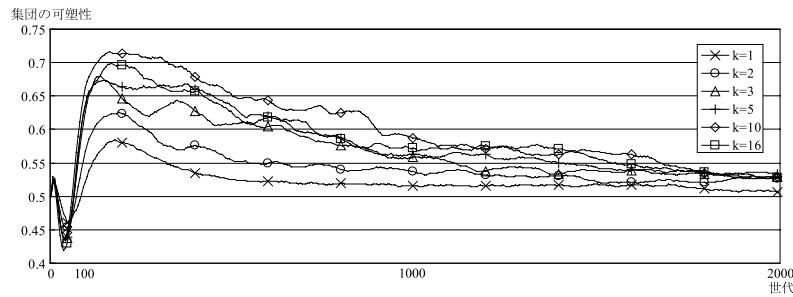


図 3 集団の可塑性

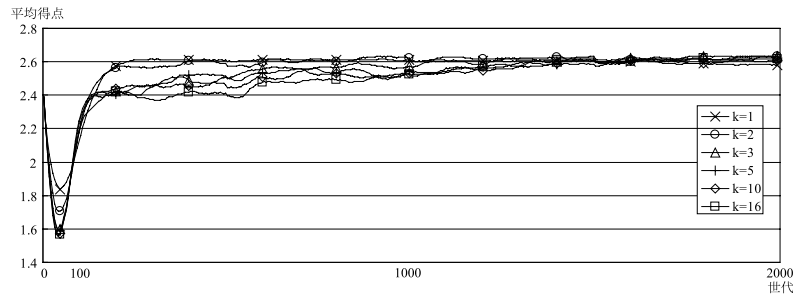


図 4 平均得点

- 表現型と履歴を参照し対戦を行い、用いた表現型 (C または D) に対応する学習遺伝子列のビットが 1 (可塑的) であった場合、その表現型を対戦結果に対応するメタ・パブプロフ学習行列の値 (C または D) と置き換えたものを新たな表現型とする。
- 次の対戦以降、新たな表現型を参照し手を決定する。

3.4 繰り返し対戦と進化

各個体は、相互作用の規模 i によって定義される近傍の個体すべてとノイズありの繰り返し対戦を表 1 に示す利得行列を用いて行う。ノイズとは、繰り返し対戦において、各戦略個体が出すべき手が確率 p_n で反転してしまうことで、現実世界における表現の間違い、転送経路のノイズ、誤解などの不可抗力を象徴するものである。また、対戦の繰り返し回数は固定せず、各対戦の後に確率 p_d で対戦をさらに繰り返すかどうかを毎回決定するものとする。したがって、繰り返し対戦回数が n である確率は $P(n) = (1 - p_d)p_d^{n-1}$ ($n = 1, 2, \dots$) となる。

前節で示したとおり、本研究で用いられる戦略が次の手を決定するためには履歴が必要である。そこで、各繰り返し対戦の初回は、繰り返し対戦ごとにランダムに作成された仮想の履歴を各個体が参照し、初回の手を決定するものとする。また、可塑的な戦略における表現型は、繰り返し対戦ごとに初期状態 (GS が示すままの状態) に戻されるものとする。

次世代において各グリッドを占める個体は、図 2 の i の場合と同様にして定義される近傍のグリッドとそれ自体の上の $(2r + 1)^2$ 個体から、適応度に比例したルーレット選択により選択される。その際、確率 p_m で遺伝子のビットが反転する一点突然変異を導入する。なお、計算

量を軽減するために、繰り返し対戦において、2 個体の遺伝子情報の組み合わせが初めて行われるものである場合は、繰り返し対戦を 20 回行ったときの平均得点を対戦結果として用いるとともにその得点を保存し、既に同じ組み合わせによる対戦が行われていた場合には対戦を行わず、保存していた平均得点を対戦結果として用いる。ただし、500, 1000, 1500 世代ごとに、それまでに保存していたすべての得点を消去し、新たに計算し直すものとする。

4. 実験結果と考察

4.1 局所性と可塑性の進化

まず、空間的局所性の与える基本的な特性を把握するため、局所性を表現する 2 つの環境パラメータに同一の値 k を用いて実験を行った。他のパラメータとしては $W = 33$, $p_m = 1/1500$, $p_n = 1/25$, $p_d = 99/100$, 世代数 2000 を用いた。図 3, 図 4 はそれぞれ、 $k = i = r = 1, 2, 3, 5, 10, 16$ を用いた場合における、集団の可塑性と平均得点の推移を表したものである。集団の可塑性とは集団中のすべての可塑性遺伝子列 GP に占める 1 のビットの割合である。本モデルにおいて、集団の可塑性は図 1 の表現型可塑性に相当し、平均得点は適応度に相当する。なお、グラフは 100 回の試行での世代ごとの平均である。

局所性の値 k の大小にかかわらずに共通して観察されたことは、基本的に [鈴木 00] と同様の進化の過程をたどり、Baldwin 効果を通して最終的に $[x00x]$ 型の戦略 (GS の最初と最後のビットが任意、真中の 2 つビットが 0, GP が 1001 である戦略) が集団中を占めたことで

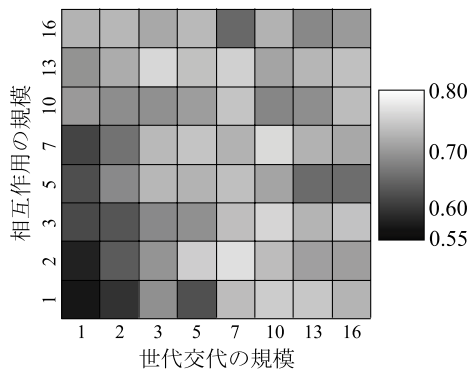


図 5 集団の可塑性の最高値

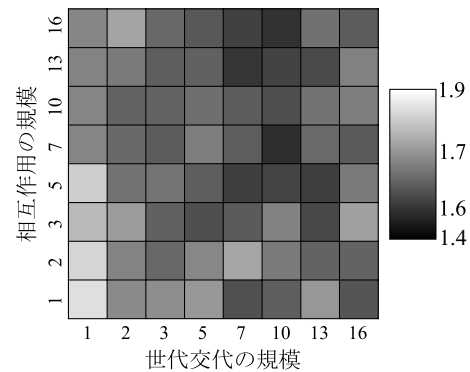


図 6 平均得点の最低値

ある。

また、図 3 より、 k によって集団の可塑性の進化の様子が大きく異なっていることがわかる。特に、Baldwin 効果の第 1 段階と第 2 段階の境界における可塑性のピークは、 k が小さい場合には低く、 k が大きくなるにつれて高くなる傾向があると言える。

このような結果となった要因として、次のことが挙げられる。 k が小さいことは、環境がより局所的であることを意味する。IPD の戦略の進化に空間的局所性を導入した場合には、より協調的な戦略が進化しやすいことが指摘されている [Grim 96]。この理由として、一般的には、協調的な戦略は同種同士の対戦で高い得点を得ることができるので、協調戦略のクラスターを拡大することができるためであるとされている。このことは、図 4 において、 k が小さいほど、進化の初期段階における平均得点の落ち込みが少ないことから確認できる。このような条件では、進化の初期段階での裏切り戦略の侵入が少ないために、協調集団への進化の際に可塑性は必要とされず、早い段階で [x00x] 型の戦略が集団中を占めたと考えられる。逆に、 k が大きい場合には、進化の初期段階において裏切り集団の侵入が顕著であるために、そこから協調集団への進化に十分な可塑性が必要とされたと考えられる。

さらに、図 4 において、どの条件でも平均得点は最終的に 2.6 程度に収束するが、 k が高くなるほど、その収束が遅い傾向が観察される。これは、 k が大きくなり、裏切り集団の侵入が容易で不安定な環境となることが、一時的に可塑的でない裏切り戦略が集団中を占める例外的な進化を招いたためであると考えられる。

Kauffman は、自身の提案した *NKC* モデルを用いて個体間相互作用に基づく動的なシステムの挙動を解析し、適応度に関する他の個体との依存度 C が大きいほど、環境は複雑な挙動を示すことを指摘した [Kauffman 93]。本研究において、この依存度は k に相当し、この実験結果は彼の主張を支持すると共に、表現型可塑性の進化は複雑な挙動を示すシステムをより安定させる働きがあることを示している。

4.2 相互作用の規模と世代交代の規模

次に、局所性に関する 2 つの環境パラメータを個別に設定した条件で実験を行った。他のパラメータは前節と同様の設定を用いた。図 5 は相互作用の規模 i 、世代交代の規模 r を個別に設定して実験を行い、それぞれの条件において、集団の可塑性について試行中で最も高い値を濃淡 (黒:0.55, 白:0.8) で示したものである。この可塑性の最高値の高低は、裏切り集団から協調集団への進化の際に、可塑性がどれだけ要求される環境であったかを示している。また、図 6 は、試行中で平均得点の最も低い値を濃淡 (黒:1.4, 白:1.9) で示したものである。この値が低いほど、進化の初期において裏切りのな戦略の侵入が顕著であったことを示している。なお、各値は 5 回の試行の平均である。

図 5 より、相互作用の規模 i 、世代交代の規模 r が共に小さくなるに従って可塑性の最高値は次第に低くなっており、このとき局所性による影響が大きくなっていることがわかる。しかし、一方の局所性のみが高くて、もう一方の局所性が低い状況では局所性の影響がほとんど無いこともわかる。従って、この環境においては、局所性に関する 2 つの条件が共に満たされた場合にのみ、局所性は進化の過程に大きな影響を与えようと言える。

このことは、次の理由によると考えられる。前述のとおり、局所性が可塑性の進化に与える影響を考える上で、同種同士の対戦の頻度は、協調戦略が高い得点を得るのに有利であるために重要な要素となる。実際、図 6 より、相互作用の規模と世代交代の規模双方が小さい場合において、平均得点の落ち込みは最も小さくなっていることがわかる。

ここで、相互作用の規模、世代交代の規模が共に小さい場合と、一方のみが小さい場合の戦略の分布と対戦相手の選択を模式的に図 7 に示す。同図より、相互作用の規模、世代交代の規模共に小さい場合には中央のプレイヤーの近傍には同種の個体が多く含まれる。一方、相互作用の規模のみが大きい場合には、戦略の分布は局所的でも近傍が大きいために同種を超えた遠くの個体をも対戦相手として選択することになり、同種同士の対戦頻度

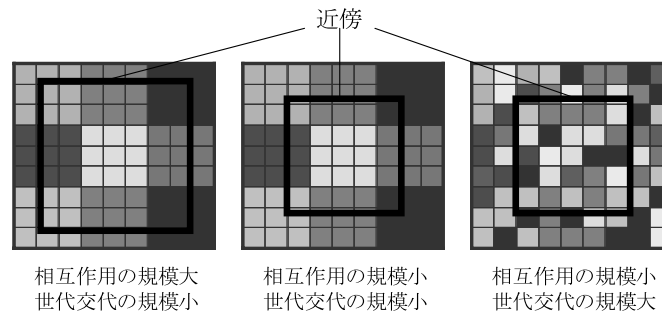


図 7 局所性と戦略の分布

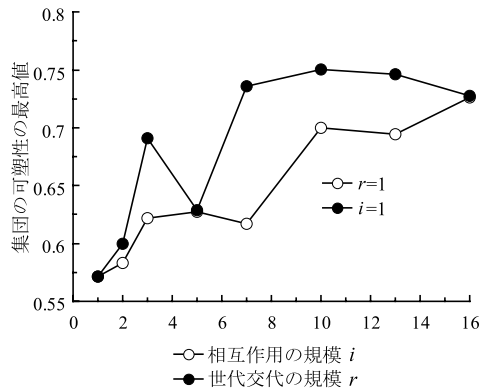


図 8 2つの局所性の変化に対する可塑性の最高値の比較

は低くなる．また，世代交代の規模のみが大きい場合には，自身から近い距離にある個体のみを対戦相手として選択しても，大域的な世代交代により遠くのグリッドから個体が選択される確率が高いために，その個体が同種である可能性が低くなる．従って，2つの局所性が高い場合にのみ協調戦略の進化に有利な状況となり，協調集団への進化において可塑性は必要とされなかったと考えられる．

また，2つの局所性は可塑性の最高値に関して全く同等の影響を与えているのではなく，相互作用の規模が小さい場合 ($i=1, 2$) における世代交代の規模の増加が，世代交代の規模が小さい場合 ($r=1, 2$) における相互作用の規模の増加と比べ，可塑性の最高値をやや高くする傾向が見られる．図 8 は， $i=1$ で r を変化させた場合， $r=1$ で i を変化させた場合の可塑性の最高値の推移を示したものである．同図より， $i=r=1$ の設定時からの i および r の増加に伴い，ばらつきはあるものの r の増加の方が高い可塑性の最高値をもたらしている（世代交代に関する局所性の減少の方が，可塑性の頻度の増加の抑制をより弱めている）ことがわかる．これは，世代交代の規模が大きいことによる全域的な世代交代が，適応的な戦略が集団全体に急速に伝播するのを促進するために，進化の初期段階において適応的な裏切り戦略の侵入を容易にしているためであると考えられる．

これら 2つの局所性の設定を変更することは，戦略個

体の側から見れば，自身の置かれる環境の特性が変化することを意味する．この実験結果は，環境の違いに対し可塑性進化のメカニズムが柔軟に対応し，協調集団への進化を導いたことを示している．

5. おわりに

本稿では，動的環境における進化と学習の相互作用に関して空間的局所性がもたらす影響を解析するために，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 2次元平面に拡張したモデルを用いて，進化実験を行った．

その結果，空間的局所性の導入により，導入前と比較して，Baldwin 効果の第 1 段階における可塑性の頻度の増加が強く抑制されることが明らかになった．これは，局所性の導入が，協調集団への進化に有利な環境を作り出し，進化の初期段階における裏切り戦略の侵入を減少させるために，協調集団への進化に可塑性が必要とされなかったことによると考えられる．

さらに，従来，空間的局所性に関して区別されてこなかった，相互作用および世代交代に関する局所性を区別して進化実験を行った．その結果，相互作用に関する局所性は対戦相手の候補を制限し，世代交代に関する局所性は戦略の分布を制限することにより，進化の過程に異なった形で影響するが，どちらも Baldwin 効果における可塑性の頻度の増加を抑制する傾向があることが明らかになった．しかし，その影響は，片方の局所性のみが高い場合では小さく，両者が高い場合において最も大きくなり，このとき可塑性の頻度の増加が最も強く抑制されることが判明した．また，両者の影響の大きさを比較した場合，世代交代に関する局所性の方が，可塑性の頻度の増加をより大きく抑制する傾向があることなども明らかになった．

現実世界において，局所性が集団全体の挙動に大きな影響を与えていることは自明である．しかし，現実世界が実際のどの程度の局所性の下に成り立っているかを知るのは容易ではない．本研究で得られた結果は，どのような局所性を持った環境においても，表現型可塑性の進化がその影響を柔軟に吸収し，協調集団への進化を導いたことを示している．これは，我々の表現型可塑性の進

化の枠組みが、より現実的なマルチエージェントシステムの進化的獲得において重要な要素となることを示唆するものである。

現在、空間的局所性のより詳細な解析に加え、局所性自体も選択圧を受けるような設定での進化について実験および解析を行っている。

謝 辞

最後に、本研究の一部は財団法人 堀情報科学振興財団 第10回研究助成の援助を受けて行われたことを記し、感謝の意を表する。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Arita 00] Arita, T. and Suzuki, R.: Interactions between Learning and Evolution: The Outstanding Strategy Generated by the Baldwin Effect, in *Proceedings of Artificial Life VII*, pp. 196-205 (2000).
- [Axelrod 84] Axelrod, R.: *The Evolution of Cooperation*, Basic Books (1984).
- [Baldwin 96] Baldwin, J. M.: A New Factor in Evolution, *American Naturalist*, Vol. 30, pp. 441-451 (1896).
- [Grim 96] Grim, P.: Spatialization and Greater Generosity in the Stochastic Prisoner's Dilemma, *BioSystems*, Vol. 37, pp. 56-58 (1996).
- [Hinton 87] Hinton, G. E. and Nowlan, S. J.: How Learning Can Guide Evolution, *Complex Systems*, Vol. 1, pp. 495-502 (1987).
- [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).
- [Kauffman 93] Kauffman, S. A.: *The Origins of Order: Self Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press (1993).
- [Lindgren 91] Lindgren, K.: Evolutionary Phenomena in Simple Dynamics, in *Proceedings of Artificial Life II*, pp. 295-312 (1991).
- [Nowak 92] Nowak, M. A. and May, R. M.: Evolutionary Games and Spatial Chaos, *Nature*, Vol. 359, pp. 826-829 (1992).
- [Sasaki 99] Sasaki, T. and Tokoro, M.: Adaptability of Darwinian and Lamarckian Populations toward an Unknown New World, in *Proceedings of the 5th European Conference on Artificial Life*, pp. 39-48 (1999).
- [鈴木 00] 鈴木麗壘, 有田隆也: 進化と学習の相互作用-繰返し囚人のジレンマゲームにおける Baldwin 効果, 人工知能学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 495-502 (2000).
- [Suzuki 00] Suzuki, R. and Arita, T.: Interaction between Evolution and Learning in a Population of Globally or Locally Interacting Agents, in *Proceedings of the Seventh International Conference on Neural Information Processing*, pp. 738-743 (2000).
- [Turney 96] Turney, P., Whitley, D., and Anderson, R. W.: Evolution, Learning, and Instinct: 100 Years of the Baldwin Effect, *Evolutionary Computation*, Vol. 4, No. 3, pp. 4-8 (1996).
- [Yamasaki 00] Yamasaki, K. and Sekiguchi, M.: The Clear Explanation of Different Adaptive Behaviors between Darwinian Population and Lamarckian Population in the Changing Environment, in *Proceedings of the Fifth International Symposium of Artificial Life and Robotics*, pp. 120-123 (2000).

[担当委員: 櫻井彰人]

著 者 紹 介

鈴木 麗壘(学生会員)

1998年名古屋大学情報文化学部自然情報学科退学(飛び級のため). 2000年名古屋大学大学院人間情報学研究所博士課程前期修了(学術修士). 現在, 名古屋大学大学院人間情報学研究所博士課程後期在学中.

有田 隆也(正会員)

1983年東京大学工学部計数工学科卒業. 1988年同大学大学院工学系研究科修了. 工学博士. 名古屋工業大学講師, カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員を経て, 現在, 名古屋大学大学院人間情報学研究所助教授. 人工生命や情報科学の研究に従事. 言語の進化, 人間行動の進化, 進化的計算論などに興味を持つ. 情報処理学会, 日本認知科学会, 電子情報通信学会各会員.