

異集団による囚人のジレンマ

安 田 俊 一

0 は じ め に

Axelrod による繰り返し囚人のジレンマ (Repeated Prisoner's Dilemma : 以下 RPD) に関するコンピュータトーナメント実験, 及びその後に行われた遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms : 以下, GA) による実験はたいへん有名である¹⁾。

彼の実験はすべて同質な個体からなる集団の間でのゲームを取り扱っているし, それ以降の同種の実験でもすべてプレイヤーは同質である。いいかえればこれまでの研究はすべて1集団内で個々のプレイヤーが対戦するものであり, 性質が異なるプレイヤーとの対戦は考えられてこなかった。

しかしながら現実により近い状況ではプレイヤーの性質がすべて同じであるとは考えられない。むしろ異質な個体同士がゲームを行う状況の方がより普遍的であろう。2001年9月11日のニューヨーク国際貿易ビルへの自爆テロ以降, イスラム社会とアメリカ流自由主義社会との間の異質性が強調されているが, 特にイスラム社会に限らず, 世界は多かれ少なかれ文化や思考方法の異なる集団によって成り立っている。むしろ異質な集団であるからこそ集団間のコンフリクトが絶えないのである。

そのような異質な集団間でゲームが行われた場合, 集団は“協力解”へ到達できるのであろうか? また, ゲームを行った結果現れる集団は単一集団でゲ

* 本稿は 2002 年度松山大学特別研究助成による研究成果である。

1) Axelrod (1980a, 1980b, 1987)

ームが行われた結果による場合とどのような性質の違いがあるのだろうか？これが本稿の背景にある問題意識である。

本稿の目的は、RPD が性質の異なる集団の間で行われた場合、性質が等しい集団内で行われた場合と比較してゲームの結果がどのように違ってくるかをシミュレーションによって確認することにある。

さて、性質の異なる集団、と言う場合、その「性質」として何を取り上げるかが問題となろう。ここでは「過去のゲームに関する記憶の長さ」を集団の性質としてとりあげる。

筆者は GA による RPD 実験の拡張をおこなってきたが、それらの結果から、協力解の生成に重要な影響を与える要因が“過去のゲームに関する記憶の長さ”であることが明らかになってきた²⁾

Axelrod 流の GA コーディングでは“過去のゲームに関する結果を何回前まで覚えているか”という「記憶の長さ」がゲームの結果に大きな影響を与える(後述)。

そこで記憶の長さが異なるという意味で“異質な集団”の間で RPD が行われた場合、記憶の長さは集団にどのような影響をもたらすかを検討する³⁾

シミュレーション結果は記憶の長さが異なる集団でゲームが行われた場合は、それが等しい集団内でゲームが行われた結果と比べて協力への共進化が少なくなること、長い記憶を元にプレイを行う集団は、短い記憶を持つ集団に比較して平均利得が小さくなる傾向があることが示される。特に後者の結果は直感的な推測結果とは逆であり、注目すべき結果である。

2) 安田俊一 (2001a)

3) 従来の GA を用いた RPD 研究では記憶の長さが異なる集団について取り扱った例は筆者が調べた範囲では、ない。GA ではなく、replicator dynamics (利得に応じて子孫を残すメカニズムをそなえたシミュレーション) を用いて、記憶の長さが異なる可能性を持った集団進化を研究した例として、Lindgren (1991) がある。

1 記憶の長さ

Axelrod が RPD を GA にコーディングする際に秀逸であったのは RPD における戦略を過去に行われたゲームの記憶によって決めるという手続きを確立したことである⁴⁾

例えば過去 3 回分の相手と自分の選択（この場合は ‘C’（協力 or 沈黙）と ‘D’（裏切り or 自白））を記憶しているとすれば、プレイヤーが行ったゲームの歴史は「CCCDDC」のように 6 つの文字からなる文字列で構成できる。この場合、1 回目のゲームでは自分と相手の双方の手が ‘C’（「CC」）、2 回目は自分が ‘C’ で相手が ‘D’（「CD」）、3 回目は自分が ‘D’ で相手が ‘C’（「DC」）である。この文字列を「記憶領域」と呼ぼう。記憶領域の ‘C’ に ‘0’、‘D’ に ‘1’ を対応させると、この文字列を 1 つの 2 進数に読み替えることができる（例えば上のケースでは 000110）。過去のゲームの歴史は、この場合には $2^6 = 64$ 通りの可能性が考えられるから、長さ 64 の ‘C’ と ‘D’ からなる文字列を用意して（この文字列を「戦略領域」と呼ぼう）2 進数化された記憶を 10 進数に変換した数値が示す個所（上のケースでは $(000110)_2 = (6)_{10}$ ）を次のゲームで出す手と決めておけば、戦略領域の長さ 64 のバイナリ文字列がゲームに参加する個体が持つ戦略となる。

記憶領域 6 ビットの後ろに 64 ビットの戦略領域を付加すると、合計で 70 ビットのバイナリ文字列が構成される。これを個体の染色体とみなして GA を行う。これが Axelrod が使った手法であった。

この方法によると、過去のゲームを記憶している回数が多ければ多いほど、戦略を示す領域の長さは長くなる⁵⁾。その結果、個体は様々な状況に対する対応を学ぶことになるため全世代を通じて集団の平均利得は高めになり、「完全な

4) ただし、彼のコーディングと交叉の手続きは遺伝子型と表現型を混同しているという意味で問題がある。安田俊一 (2001b)

5) 記憶回数が「前 2 回」であれば戦略領域の長さは $2^{2 \times 2} = 16$ 、「前 5 回」であれば $2^{2 \times 5} = 1024$ 。詳しくは Axelrod (1987) 参照。

裏切り」へ集団が進化するケースは少なくなる⁶⁾

過去のゲーム結果についての記憶の長さは、集団の進化に大きな影響をおよぼすのである。

2 シミュレーションモデル

本稿でおこなう GA は基本的なものである。記憶の長さ (L) に応じて大きさが異なるバイナリ文字配列を「染色体」として持つ個体の集合を「集団」と定義する。1 集団はすべて同じ長さの記憶を持つものとする。例えば $L=3$ の集団に属する個体は、大きさ 6 の記憶領域と大きさ 64 の戦略領域を持つ。集団に含まれる個体数 (m) を 50 とし、2 つの集団からランダムに選ばれた 2 個体によって囚人のジレンマゲームを有限回繰り返して行い⁷⁾、ゲーム一回当たりの平均利得をその個体の適合度とする。両集団の全個体が一連の繰り返しゲームを終えると、各個体の適合度に応じて次世代の“親”となる個体を選ばれる (選択)⁸⁾。

‘親’となった 2 個体のそれぞれの戦略領域は確率 0.25 でそれぞれの一部分を交換する (交叉)。交換された戦略領域はあたらしい個体の戦略領域となる。その際、各ビット 0.001 の確率で文字が反転 (‘C’ → ‘D’ or ‘D’ → ‘C’) する (突然変異)⁹⁾。

また、‘親’の記憶領域はそのまま新しい個体の記憶領域となる。つまり次

6) 安田俊一 (*op. cit.*)

7) ゲームの回数は平均 150 標準偏差 10 の正規分布から引き出される。なおゲームの利得行列は

	C	D
C ($R=3, R=3$) ($S=0, T=5$)		
D ($T=5, S=0$) ($P=1, P=1$)		

である。この利得行列はこのテーマに関するほとんどの研究で用いられている。

8) 集団中でもっとも高い利得を得た個体は平均 2 回、平均的な利得を得た個体は平均 1 回、親として選択され、2 個の親から 2 個の子が作られるものとする。Goldberg (1989) に基づく線形スケーリングを採用している。

9) 突然変異確率の値をどう設定するのか定説はない。しかし、Goldberg (1989) の紹介による De Jong の研究から、一般に 0.001 が用いられている。

世代の個体は前世代がおこなった最後の数回に関するゲームの記憶を引き継ぐ（ラマルクの進化）。以上の「選択，交叉，突然変異」という“GA 過程”によって作られた新しい個体からなる集団は再び同じ過程を繰り返す。本稿のシミュレーションではこの繰り返しを 500 回（500 世代）行って 1 実験とし，すべてのケースについて 1,000 回の実験を繰り返す。本稿では記憶の長さが異なる 2 集団による RPD シミュレーションを行うが，その際に注目する指標は以下の通りである。

協力への収束回数 NC 1,000 回の実験中に集団が協力へ収束した実験の回数。

協力への収束は，連続した 10 世代の中で，集団の平均利得が 2.9 を超えた世代が 5 世代以上現れた場合として定義している。この 2.9 という値は 50 個体からなる集団において 80% が“完全な協力 (C, C)”を実現させ，20% が (D, C) もしくは (C, D) を実現させた場合の値である。2 つの集団によるシミュレーションでは，両集団を合わせた全個体の平均利得がこの条件を満たした場合に「協力へ共進化した」と判定する。

裏切りへの収束回数 ND 裏切りへの収束は連続した 10 世代の中で，集団の平均利得が 1.4 を下回った世代が 5 世代以上現れた場合として定義している。この 1.4 という値は 50 個体からなる集団において 80% が“完全な裏切り (D, D)”を実現させ，20% (D, C) もしくは (C, D) を実現させた場合の値である。2 つの集団によるシミュレーションでは，両集団を合わせた全個体の平均利得がこの条件を満たした場合に「裏切りへ共進化した」と判定する。

全平均適合度 \bar{Q} GA は 500 世代で行われる。第 n 世代での各個体の適合度を $q_i^n (i = 1, \dots, m)$ とおくと，第 n 世代での集団適合度 Q^n は $Q^n = \sum_{i=1}^m q_i^n / m$ 。さらに 500 世代すべてにわたって集団の平均利得を平均した値 $Q = \sum_{n=1}^{500} Q^n / 500$ は，1 回のシミュレーションでその集団がだいたいどの水準の適合度を中心に変動したかを示すことになる。全平均適合度 \bar{Q} は 1,000 回の実験についてそれらを平均した値である。

最大分散の平均 \bar{V} 第 n 世代での集団の利得分散 v^n が1回の実験(500世代)

で最も大きかった時の値 ($v^j = \max_n v^n$) を1,000回実験分集め、それを平均した値 ($\bar{V} = \sum_{j=1}^{1000} v^j / 1000$)。1実験中での最大集団利得分散は、その集団が示す個体のばらつきに関する最大の可能性を表す。したがってこの値は集団がどの程度ばらつく傾向があるかを示す指標となる。

上の4つの指標は、集団がゲームにどのように適応するのかを観察するものであるから、記憶の長さが異なる集団間でこれらに差があるかどうかを検討することがシミュレーションの目的である。

同一集団内でGAを行う場合は、ゲームの対戦相手も交叉の相手も同じ集団に属している。だから、‘D’を出したことによって高い利得をあげた個体がいる場合は、その裏に‘C’を出して“裏切られた”個体が存在している。つまり「負け組」と「勝ち組」が集団内に存在しているわけだが、集団が異なれば片方の集団に「負け組」が固まり、対抗集団に「勝ち組」が固まる可能性がある。特に、集団の持つ性質がゲームの結果に影響をおよぼす場合は、ゲームの最終的な結果からそれらが検出できるはずである。

3 シミュレーション結果

3.1 単一集団の場合

異集団間でのシミュレーション結果を述べる前に、それと対比させるために1集団によるシミュレーション結果をまとめておこう。1集団におけるシミュレーションは対戦するすべての個体が同一の記憶長を持っている。

記憶の長さが2, 3, 4, 5であるそれぞれの集団でのシミュレーション結果をTable 1にまとめておく。

Table 1 単一集団の諸結果

記憶の長さ (L)	2	3	4	5
協力への収束回数 (NC)	263	486	616	568
裏切りへの収束回数 (ND)	776	468	95	1
全平均利得 (\bar{Q})	1.54	2.03	2.49	2.55
最大分散の平均 (\bar{V})	1.61	1.45	1.18	0.84

この結果は安田俊一 (2001a) と本質的に同じである¹⁰⁾。記憶長が長くなれば協力への収束は大きくなり、裏切りへの収束は少なくなる。また、集団の平均的な利得は上昇し、集団内の分散も少なくなる傾向がみられる。特に裏切りへの収束回数は $L=3$ から $L=4$ へ変わると急激に減少する。

これらの結果から、単一集団内でのゲームでは、記憶長が長いほど協力解を進化させやすくなる、つまりは“うまくやる”ことがわかる。また、 \bar{V} が小さくなっていくことから集団内の個体の差が減少する、いわば“平等的”になっていくことがわかる。

Fig.1 は記憶の長さが異なる単一集団における典型的な平均利得の推移を示したものである。記憶の長さが長くなるにつれて平均的な利得水準が上昇しているのがよくわかる。下側グラフの縦軸原点は2になっているのに注意しよう。 $L=4, 5$ のケースでは裏切りへの収束が全くみられない。逆に $L=2, 3$ のケースでは協力への収束も裏切りへの収束も観察される。

3.2 同一記憶長を持つ2集団の場合

Table 2 は2集団で行ったシミュレーション結果である。ここでは記憶長が等しい2集団の間でゲームが行われた結果を検討する。

2集団間でのゲームにおいては各世代での平均適合度が3を超えるケースがあることにまず注意しよう。ゲームの結果が (C, D) もしくは (D, C) であった場合、片方の集団に‘D’を出した個体が多ければ、もう片方の集団には‘C’

10) ただし、集団中の個体数は20から50へと増加している。このことが $L=5$ での NC の差になって現れている。前著においては $NC=786$ をリファレンスケースとしたが、今回は $NC=568$ と減少している。個体数が倍以上増加することによって、集団が「固まる」回数が少なくなったと考えられる。

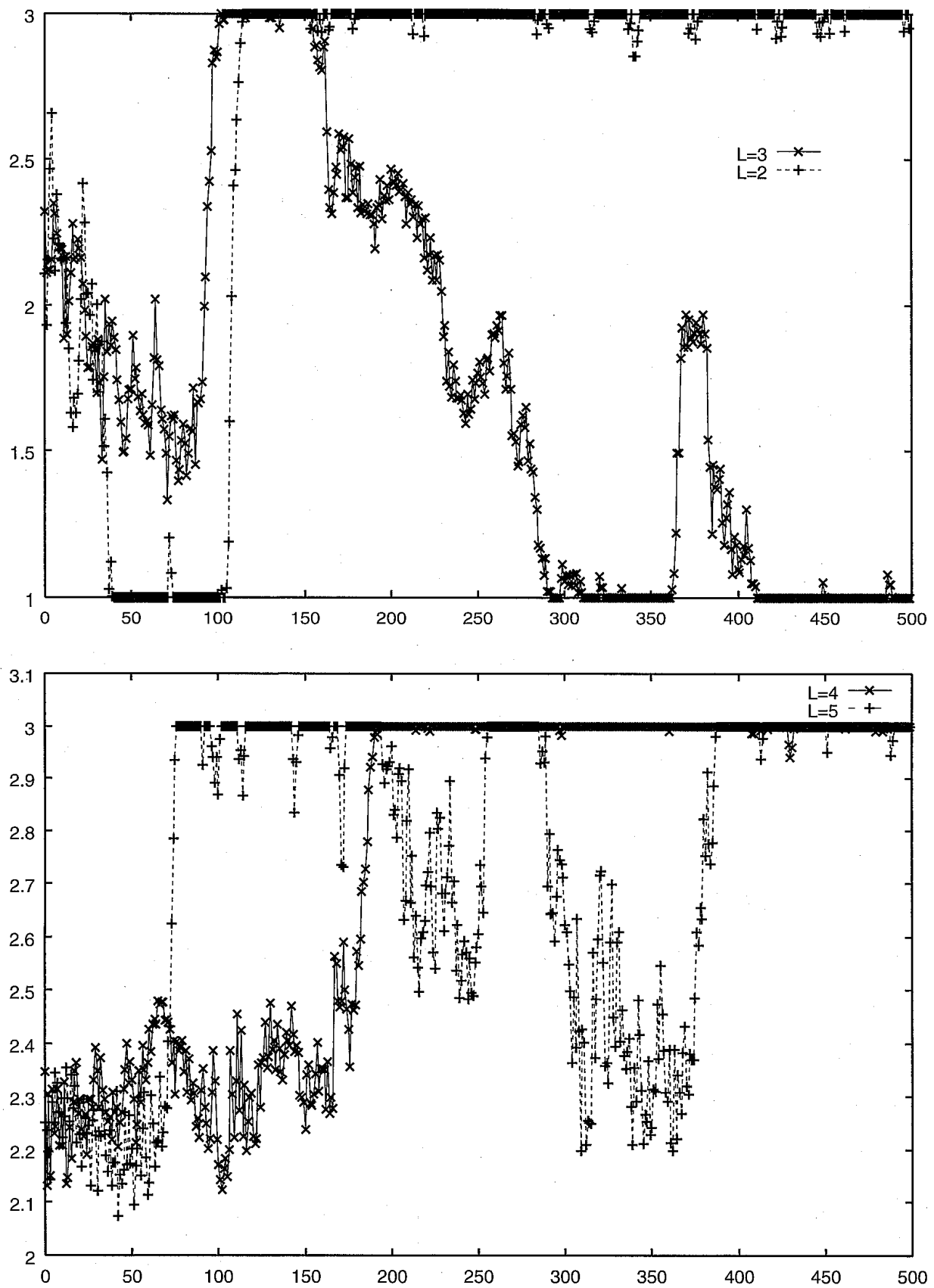


Fig. 1 単一集団における平均利得の推移 (上: $L=2, 3$, 下: $L=4, 5$)

を出した個体が多いということになる。このとき、“裏切りのな”個体が多い集団の平均適合度は5に近くなり、もう一方の集団の平均適合度は0に近くなる。このような場合を片方の集団（‘D’を出す個体が多い集団）が他方（‘C’を出す個体が多い集団）を“搾取している”状態と呼ぼう。

他方、集団の平均適合度が両方とも3に近い状態は両方の集団が“協力的行動”を学んだ場合である。このとき両集団は協力への共進化をしたことになる。

まず、Table 2 で記憶の長さが等しい2集団でのゲーム結果（ $L_A=L_B$ の行）をみよう。協力への共進化回数（NC）は記憶の長さが長くなるにつれて増加し、¹¹⁾ 逆に裏切りへの共進化回数（ND）は少なくなる。また、記憶の長さが長くなるにつれて全平均適合度（ \bar{Q} ）は増加し、最大分散の平均（ \bar{V} ）は小さくなるのがわかる。

この結果は Table 1 の結果とほとんど同じと言ってよい。別集団との対戦になっても記憶の長さが等しい集団の間でのゲームでは、記憶の長さが長い集団ほど“うまくやり”，より“平等的な”集団を形成する。

しかし、NC と ND については大きな違いがある。

全体的に2集団でのゲームでは、単一集団のゲームに比較してNCもNDも減少する。そして、減少の程度は記憶の長さが長くなるほど顕著である。¹²⁾

前節の最後で述べたように、2集団の場合には“負け組”“勝ち組”が固まりやすいと考えられる。したがって集団間での搾取が起こりうるので、協力にせよ裏切りにせよ、2集団の場合、共進化は単一集団の場合の進化よりも発生しにくい。これが全体的にNC、NDの減少をもたらす原因である。

集団内で“裏切り”によって成功した個体が高い利得をあげると、その戦略

11) 単一集団の場合でも2集団の場合でも、NCは $L=4$ のケースよりも $L=5$ のケースで小さい。この理由は突然変異の働きによると考えられる。後述。

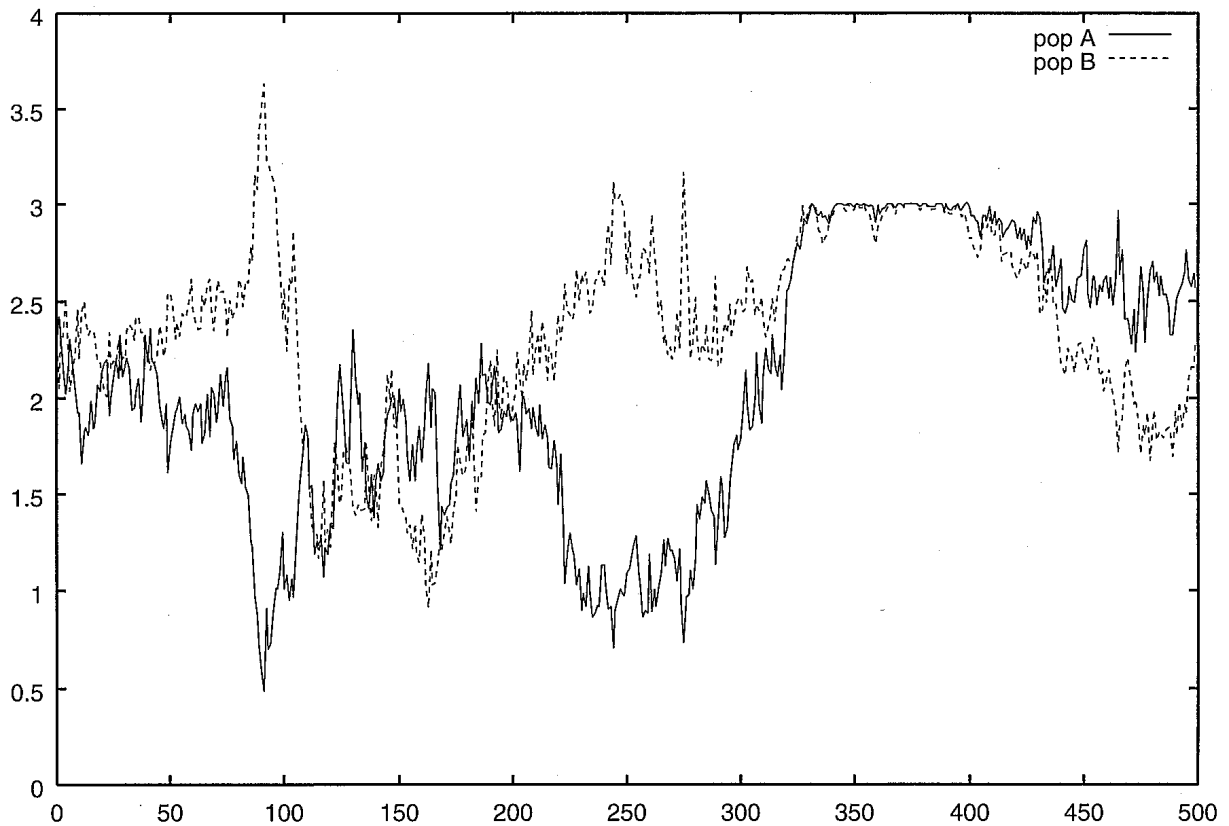
12) 染色体が短い場合には染色体のパターン自体が少ないため単一集団と2集団の場合の違いはそれほど大きくない。 $L=2$ のケースでは、2集団の場合と単一集団の場合のNCにほとんど差はなく、逆にNDは増加している。記憶の長さが少ないと、繰り返しゲームを行っていても、個体の記憶としては一回限りのゲームに近くなる。そこで、一回限りゲームの最適解である（D, D）を進化させやすくなると考えられる。

Table 2 シミュレーション結果

(L_A, L_B)	(\bar{Q}_A, \bar{Q}_B)	(\bar{V}_A, \bar{V}_B)	NC	ND
(2, 2)	(1.66, 1.65)	(2.12, 2.12)	261	829
(2, 3)	(2.05, 1.98)	(1.96, 1.98)	347	705
(2, 4)	(2.34, 1.98)	(1.77, 1.84)	367	595
(2, 5)	(2.44, 1.87)	(1.64, 1.72)	297	599
(3, 3)	(2.27, 2.25)	(1.75, 1.75)	410	432
(3, 4)	(2.51, 2.20)	(1.54, 1.57)	423	237
(3, 5)	(2.61, 2.05)	(1.37, 1.39)	321	179
(4, 4)	(2.48, 2.47)	(1.36, 1.34)	455	16
(4, 5)	(2.57, 2.37)	(1.17, 1.19)	425	11
(5, 5)	(2.48, 2.47)	(0.96, 0.96)	397	0

は集団内に広まっていく。このことは単一集団であろうと2集団であろうと変わりはない。しかし、単一集団の場合では“負け組”が同じ集団内に残っているため、その個体が持つ協力的な遺伝子と交叉する確率が一定程度は残っている。したがって交叉の結果新たに生成された個体（もしくは突然変異によって生まれた個体）に協力的な戦略が遺伝し、それが集団内に広まっていくチャンスが常にある。しかし2集団の場合には“負け組”との遺伝子交叉が行われないためそのようなチャンスはない。このため2集団における協力への共進化は、単一集団における場合よりも少なくなるのである。

2集団のケースにおいて、一方の集団（この集団をAとする）で“裏切り”によって高い利得を得た個体の戦略が広まると、負け組との交叉のチャンスがないため、裏切り傾向は強くなっていく。このとき他方の集団（この集団をBとする）では裏切られた個体は次世代で淘汰される傾向にある。ところが、B集団の中で高い利得をあげる個体はたまたま集団Aで‘C’を出した個体と対戦して(C, C)を実現させた個体であるため‘C’を出しやすい傾向はますます強まる。こうしてしばらくは集団Aに‘D’を出しやすい戦略が広まり、集団Bに‘C’を出しやすい戦略が広まっていく。これが集団Aによる集団Bの搾取が起こる場合である。集団Aの平均適合度は上昇し集団Bの平均適合度は減少していく。

Fig. 2 $L=3$ の 2 集団における平均適合度推移

ところがこの傾向は集団 B 内に ‘D’ を出す個体が現れてくると逆転する。(D, C) で 0 の利得を得るよりは (D, D) で 1 を得た個体の方が適合度が高くなるから、集団の平均適合度は上昇を始める。一方、集団 A では (D, C) によって 5 の利得をあげる個体よりも (D, D) で 1 の利得しかあげられない個体が多くなるため集団の平均適合度は低下する。この過程が進むと両集団は裏切りを進化させることになる。

Fig. 2 に $L=3$ である 2 集団のケースを示す。70 世代、250 世代あたりにおいて集団 B (グラフ pop B) は集団 A (グラフ pop A) を搾取することによって集団の平均適合度を上昇させている。そして 130 世代あたりで両集団は裏切りを短い間共進化させ、320 世代からおおよそ 100 世代にわたって比較的長期で安定的な協力を進化させたのち、今度は集団 A が集団 B を搾取する傾向が始まっている。

3.3 記憶長が異なる2集団の場合

記憶長が異なる2集団の間でゲームが行われる場合、単一集団の場合と同じ記憶長を持つ2集団の場合とも異なる特徴的な結果を得る (Table. 2 での $L_A \neq L_B$ の行)。シミュレーション結果から得られる特徴は以下の3点にまとめられる。

- (1) 記憶長が異なる集団と対戦する場合、対戦集団の記憶長が長いほど平均的な利得は高くなる。
- (2) 記憶長が異なる集団と対戦する場合、記憶長が短い集団はそれが長い集団よりも平均利得が高いという意味で“うまくやる”。
- (3) 対戦集団の記憶の長さが長くなるほどNCは増加し、NDは減少するが、 $L=5$ 集団とのシミュレーションではNCが減少する。

以下でそれぞれ検討しよう。

3.3.1 全平均利得 \bar{Q}

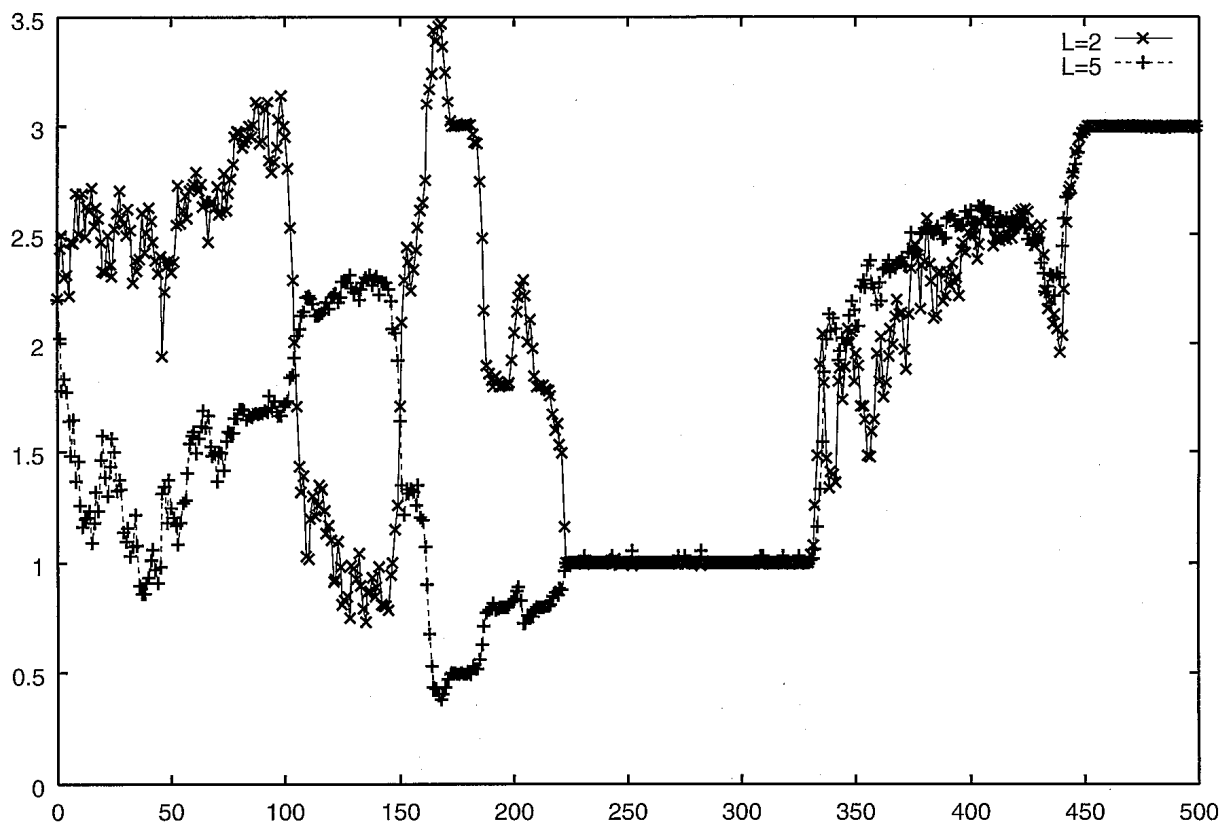
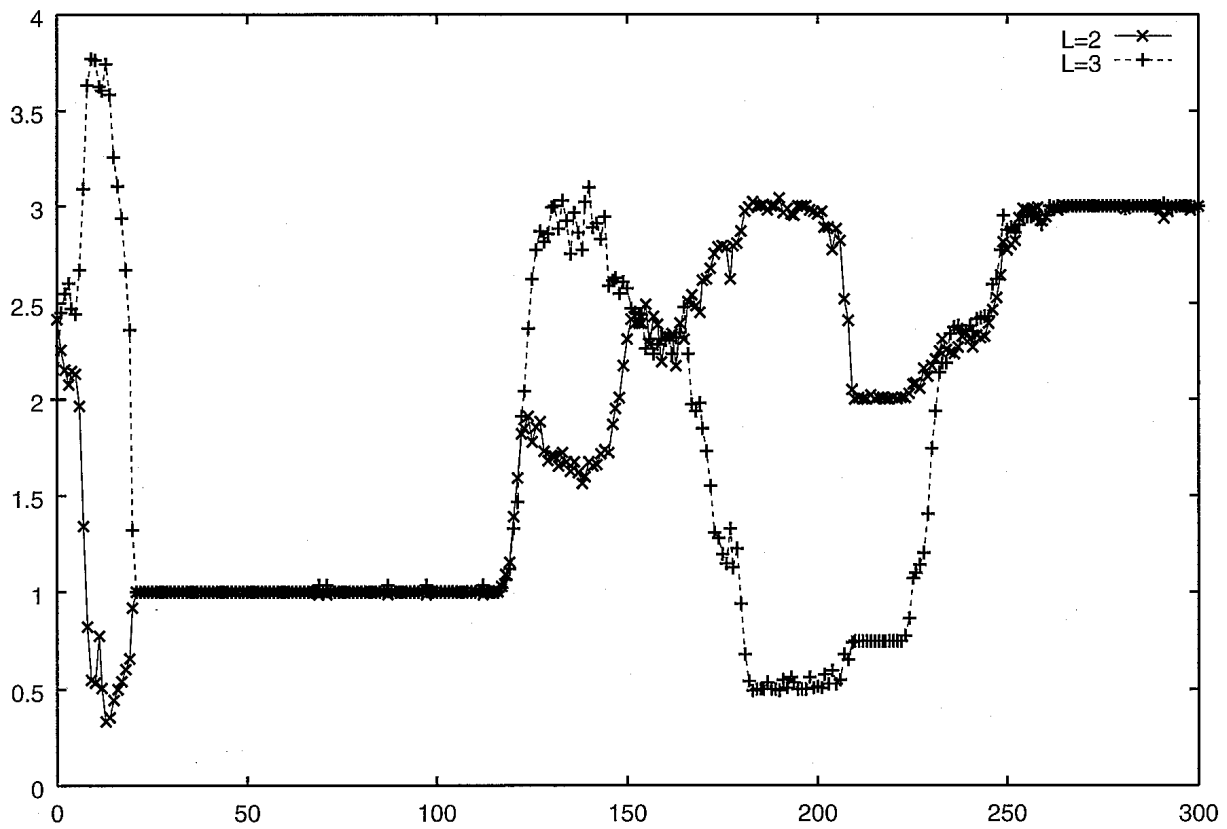
Table. 2 における (\bar{Q}_A, \bar{Q}_B) から、 $L_A < L_B$ ならば $\bar{Q}_A > \bar{Q}_B$ であることがわかる¹³⁾。すなわち、記憶長が短い集団はそれが長い集団との対戦において、より高い適合度を全般的に獲得する傾向がある。言い換えれば記憶長が短い集団はそれが長い集団を搾取する。

Fig. 3 はそれぞれ $L=2$ の集団と、 $L=3$ 、 $L=5$ の集団との間で行われたシミュレーションで、裏切りと協力について両方を進化させた場合の適合度推移をプロットしたものである¹⁴⁾。いずれのケースでも仮説 $Q_A = Q_B$ は0.5%水準で棄却されている。

両ケースともに全体の平均適合度は $L=2$ の集団の方が高い。また、これらのケースでは集団相互の搾取関係が1回のシミュレーションのなかで交代して

13) Table 2 での (\bar{Q}_A, \bar{Q}_B) についてはすべて $Q_A = Q_B$ の仮説を立てて t-検定を行った。その結果、 $L_A = L_B$ の場合を除き、すべて0.5%水準で棄却している。したがって、 $L_A \neq L_B$ では Q_A と Q_B は有意に異なる。

14) 上図においては300世代以降協力の共進化が持続するため、グラフは300世代までを示している。

Fig. 3 $L=2$ と $L=3, 5$ の2集団における平均適合度推移

いる。

しかし、 $L=2$ の集団と $L=5$ の集団との対戦では、多くのケースで、記憶長が短い集団の利得が高い。Fig. 4は、両集団が協力へ共進化した例であるが、底へ至る過程では、 $L=2$ 集団が $L=5$ 集団よりも高い平均利得で推移している。

3.3.2 共進化 (NC, ND)

Table 2から、記憶長が等しい2集団のケースとそれが異なるケースでは、後者においてNCが若干増加する傾向がみられる。さらに対戦集団の記憶長が長いほどNCは増加する（ただし $L=5$ との対戦ケースを除く）。協力への共進化がもっとも多かったのは $L=4$ の2集団、最も少なかったのは $L=2$ の2集団でのケースである。

逆にNDについては対戦集団の記憶長が長いほど低下する。特に $L \geq 4$ 集団のケースでは激減している。

裏切りへの共進化が起こりにくいのは、上述したように比較的短い記憶長を持つ集団はそれが長い集団を搾取するため平均適合度がそれほど低下しないためである。その裏返しとして記憶長が長い集団は平均利得が1近くに低下する場合が多いので“共進化”は低下する。

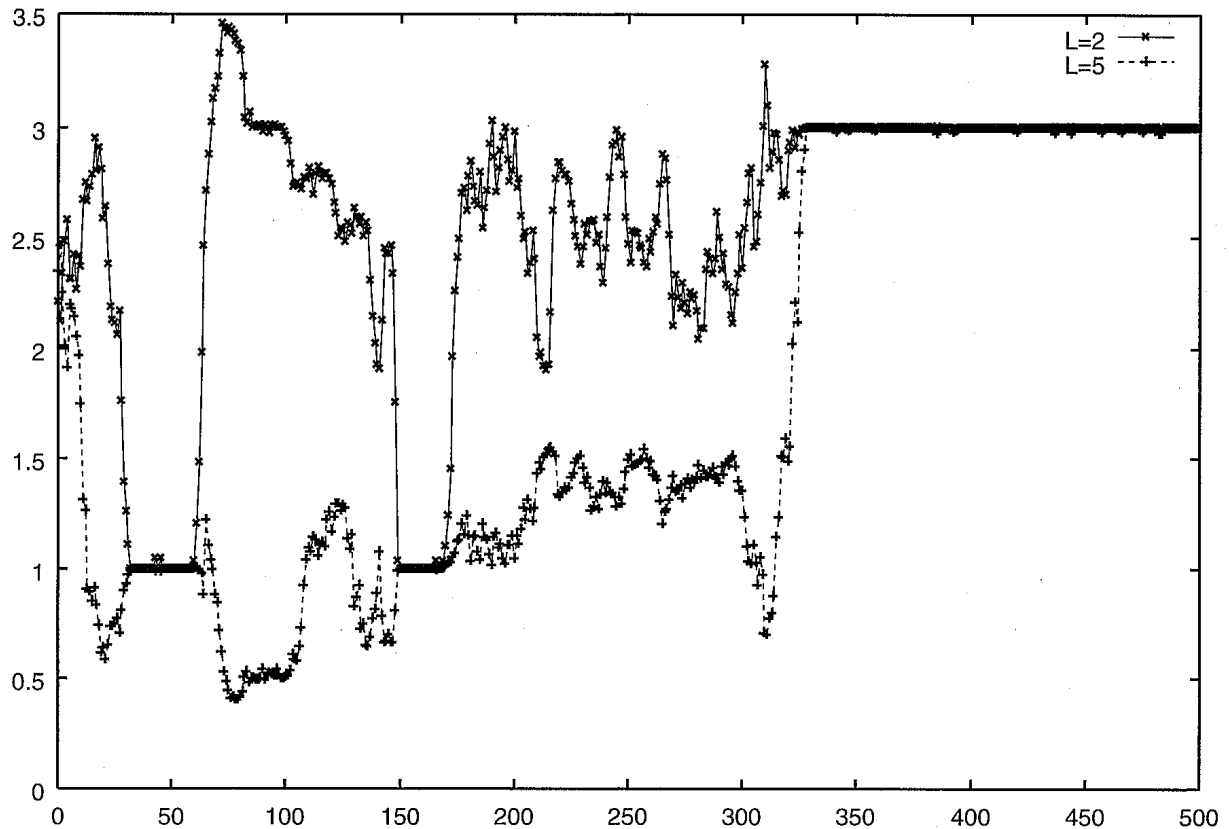
4 結 語

本稿で用いているAxelrod流の染色体定義では、記憶長が長いほど戦略領域が長く、直感的に考えれば、様々な状況に“うまく”適応し、結果として記憶長が長い集団の平均適合度はそれが短い集団と比較して相対的に高い適合度を示すはずである。

しかし、シミュレーション結果はこの予測を裏切るものであった。

単一集団、もしくは同一の記憶長を持つ2集団でゲームが行われる場合にはこの直感は正しい。記憶長が長いほど、集団の平均適合度は上昇する。

ところが記憶長の異なる集団間で行われるゲームでは、直感とは逆に、記憶

Fig. 4 $L=2$ と $L=5$ の 2 集団における典型例

長の短い集団の方が、それが長い集団よりも高い平均適合度を示した。

この結果をもたらした原因は、記憶が異なる集団との対戦において、記憶長が長い集団は、それが短い集団に対してあたかも自らが“ランダムなプレイヤー”として振る舞ってしまうことにあると思われる。

現在のところこれは仮説であるが、突然変異確率 P_m を 0.01 として同じシミュレーションを行った結果を Table 3 にまとめている。この表では今回のシミュレーションの傾向が一層強まっている。

0.01 という突然変異確率は、100 以上の長さを持つ染色体では毎回どこかで突然変異が起こっており、 $L=5$ ではおよそ 10 個の遺伝子座で毎回突然変異が発生することを意味する¹⁵⁾。この場合、 $L=5$ の集団はランダムに ‘C’、‘D’ を出すのとそれほど大きな違いがない。ランダムな集団同士の対戦では、共進

15) $L=5$ では戦略領域の長さが 1,024 であるから。

化自体が偶然発生するに過ぎないので、Table 3 にみられるように $L \geq 5$ を持つ集団同士の対戦では NC, ND が共に極端に減少している。特に $L = 5$ を持つ集団同士の対戦では両集団ともランダムプレイヤーが得る理論的な期待値 2.25 が実現している。もちろん、この仮説は短い記憶長をもつ集団がそれが長い集団を搾取する理由を完全には説明していない。この問題を分析するには Axelrod 流に「記憶にしたがって選択を行う集団」とランダムプレイヤー集団などの「まったく異なる原理で選択を行う集団」との対戦をシミュレートするなど、何らかの比較対象となる結果が必要である。それが次の課題となろう。

Table 3 $P_m = 0.01$ の場合

(L_A, L_B)	(\bar{Q}_A, \bar{Q}_B)	(\bar{V}_A, \bar{V}_B)	NC	ND
(2, 2)	(1.73, 1.71)	(2.47, 2.74)	189	981
(2, 3)	(2.15, 1.74)	(2.36, 2.46)	213	789
(2, 4)	(2.37, 1.58)	(2.03, 2.15)	113	406
(2, 5)	(2.46, 1.41)	(1.78, 1.85)	42	248
(3, 3)	(2.06, 2.06)	(2.16, 2.17)	165	275
(3, 4)	(2.34, 1.87)	(1.79, 1.89)	105	26
(3, 5)	(2.45, 1.70)	(1.52, 1.67)	24	4
(4, 4)	(2.22, 2.22)	(1.49, 1.50)	86	0
(4, 5)	(2.32, 2.12)	(1.02, 1.26)	35	0
(5, 5)	(2.25, 2.25)	(0.91, 0.92)	29	0

References

- 安田俊一 (2001a). 記憶におけるノイズ-GA による囚人のジレンマ実験(3)ー. 松山大学論集 13(6), 173-191.
- 安田俊一 (2001b). GA による囚人のジレンマ実験ーダーウィンの手法とラマルクの手法ー. 松山大学論集 13(2), 37-62.
- Axelrod, R. (1980a, March). Effective choice in the prisoner's dilemma. *Journal of Conflict Resolution* 24(1), 3-25.
- Axelrod, R. (1980b, September). More effective choice in the prisoner's dilemma. *Journal of Conflict Resolution* 24(3), 379-403.
- Axelrod, R. (1987). The evolution of strategies in the iterated prisoner's dilemma. In L. Dabiz (Ed.), *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*, pp. 32-41. Pitman.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*.

Addison-Wesley.

Lindgren, K. (1991). Evolutionary phenomena in simple dynamics. In C. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, and S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II*, pp. 295–312. Addison-Wesley.

Michalewicz, Z. (1999). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs* (3rd rev. and extended ed.). Springer.

Mitchell, M. (1996). *AN INTRODUCTION TO GENETIC ALGORITHMS*. Cambridge: The MIT Press.

Riechmann, T. (1999). Learning and behavioral stability. *Journal of Evolutionary Economics* 9, 225–242.