

# 根本的に性質が異なる集団間での 囚人のジレンマ実験

安 田 俊 一

## 0 は じ め に

筆者は一連の遺伝的アルゴリズム（以下、GA と表記する）による囚人のジレンマ実験のひとつとして、前著において「記憶の長さが異なる」タイプのプレイヤーによるゲームの分析を行った（安田俊一（2004））。

Axelrod 流のプレイヤー定義では、「過去のゲームを覚えている回数（記憶の長さ）」が遺伝的アルゴリズムにおける染色体の長さを決める。前著での分析では記憶回数の長さの違いが集団の行動にかなりの変化をもたらすことが明らかになった。

そのシミュレーションで用いた集団は Axelrod 流のプレイヤーから構成されており、記憶の長さの違いはあっても、その意味では“同じタイプのプレイヤー”である。プレイヤーは「過去のゲームの記憶」を元に行動を決定する<sup>1)</sup>。その行動原理はすべての集団で同一であった。

これをたとえて言えば、アメリカ・ヨーロッパ・日本は、それぞれ性質は異なるものの、大きな枠組みではいずれも同じ“先進資本主義諸国”に属しているという意味で、三者は“同じタイプのプレイヤー”であるようなものである。性質に違いはあっても行動原理は同じとみなしてよい。

---

1) 過去のゲームにおける自分と相手の行動の記憶から構成される記憶領域を2進数と解釈し、10進数へ変換して戦略領域から今回のゲームにおける行動を決定する。Axelrod (1997) 参照。

したがって、前著において筆者が行ったシミュレーションは現実的なゲーム状況を記述していたわけではないにしても、「日・米・欧」間でのゲームの分析に例えられうる。

それに対して、現在のイラクにおける紛争では「アメリカ」と「イスラム原理主義」が主要な対立軸になっている<sup>2)</sup>。両者の間では根本的に行動原理が異なっており、同質なプレイヤーによるゲームの枠組みでとらえられるものではない。

これが今回の分析の背景にある問題意識である。

本稿では、集団行動としてはまったく原理が異なる集団、各プレイヤーが行動を決定する際に基礎となる原理そのものが異なる集団の間で囚人のジレンマゲームが行われる場合、それぞれの集団はどのような進化を行うかをシミュレーションを通じて観察する。

前著では“性質が異なる”という場合の「性質」をどのように想定するかが問題であった。本稿でも前著と同じく“行動原理が異なる”という意味をどう捉えるかが問題となる。ここでは、これまで著者が行ったシミュレーションの延長で、行動原理が異なる集団として「Axelrod タイプ」「Nowak & Sigmund タイプ」また、「Random タイプ」を取り上げる。

Axelrod タイプ集団は「行動原理が一貫しており、行動が確実で、遺伝機構（学習機構）をもった集団」、Nowak & Sigmund タイプ集団は「行動原理は一貫しており遺伝機構（学習機構）も持っているが、行動が確率的で不安定な集団」、Random タイプ集団は「行動原理をもたず、行動が不安定な集団」と類別できる。

---

2) イラクの状況をこのように述べることは現実的な視点からは問題があろう。イラクでのアメリカの行動に反対行動を行っている全ての勢力がいわゆる「イスラム原理主義者」ではない。ここではわかりやすいであろう例えとして使っていることを了承されたい。もちろん対立のひとつの原因に本稿で取り扱っている「行動原理の違い」があることは間違いないと思っているし、イラクでの事態が前稿と本稿での問題を考える契機となった。

## 1 集団の行動原理

### 1.1 Nowak & Sigmund タイプ

「Nowak & Sigmund タイプ」は Nowak and Sigmund (1992) での個体定義を元に安田俊一 (2001b) で取り上げたタイプである。このタイプの個体では2つの実数の組  $(p, q)$ ,  $(0 \leq p, q \leq 1)$  が行動を決定する。

$p, q$  は「1 回前の相手の行動」による条件付き確率で,  $p$  は「前回相手が“協力(C)” した場合に次に自分が“協力” する確率」,  $q$  は「前回相手が“裏切った (D)” 場合に次に自分が“協力” する確率」である<sup>3)</sup>

さて, 安田俊一 (2001b) では, このモデルが戦略変遷を表現できることに着目して, Fig. 1 のような分類を行った。

		$q$			
				All-C	
				(1, 1)	
tolerant		1		3	
reprisal		2		4	
				$p$	
(0, 0) All-D		teacherous		polite	(1, 0) TFT

Fig. 1 : 戦略による分類

3) したがって, このモデルでは TFT は  $(1, 1, 0)$ , ALL-C (常に“C”を出す戦略) は  $(1, 1, 1)$ , All-D (常に“D”を出す戦略) は  $(0, 0, 0)$  STFT (最初の1回は“D”を出し, そのあとは TFT と同じに振る舞う戦略) は  $(0, 1, 0)$  で表される。

左側領域 ( $p < 0.5$ ) にある個体は相手の協力に対して裏切りで反応しがちであることを意味するので「裏切りの (treacherous)」な個体であり、右側領域 ( $p \geq 0.5$ ) にある個体は反対に「礼儀正しい (polite)」。

下側領域 ( $q < 0.5$ ) にある個体は相手の裏切りに対して裏切りで反応しがちであるので「報復的 (reprisal)」な個体であり、上側領域 ( $q \geq 0.5$ ) にある個体は反対に「寛容 (tolerant)」である<sup>4)</sup>。

「0」「1」からなる長さ20の配列を染色体とし、前半10ビット、後半10ビットをそれぞれ2進数と読んで、前半に実数  $p$  を、後半に実数  $q$  を対応させる<sup>5)</sup>。表現型はこの2つの実数の組み合わせ、 $(p, q)$  である ( $0 \leq p, q \leq 1$ )。

各個体は相手の前回の行動が「C」で（「D」で）あった場合に、今回のゲームでは確率  $p$  で（ $q$  で）「C」をとる。

このタイプの個体は、相手の行動に応じて自分の行動を決めるというルールを持っており、それは一貫しているがその行動は確率的にしか決定できない。しかし染色体の構造を進化させることにより、行動の確率自体を変化させて状況に適応することができる。

## 1.2 Random タイプ, Axelrod タイプ

Random タイプ集団に属する個体は、文字通りランダムに「C」「D」を出す。さらにこのタイプに属する個体は遺伝機構をもたない。この点で前述の Nowak

4) この分類にしたがって安田俊一 (2001b) ではそれぞれの領域に以下のような名前をつけた。

領域1にある個体は、前回の相手の協力に対しては裏切りで、裏切りに対しては協力で報いる傾向があるので、「あまのじゃく」

領域2にある個体は前回の相手の手に拘らず裏切る傾向にあるので、「非協力者」

領域3にある個体は前回の相手の手に拘らず協力する傾向にあるので、「お人好し」

領域4にある個体は、前回の相手の協力に対しては協力で、裏切りに対しては裏切りで報いる傾向にあるので、「互恵主義者」

本稿でもこの分類を使用する。

5) 10ビット2進数は、整数0-1023までを表現できる。これを区間  $[0, 1]$  の実数に対応させるので、2進表現された整数を1023で除して表現型とした。

& Sigmund タイプのプレイヤーと異なり、行動のランダムさも変化しない。つまり行動が不確実であるだけでなく、行動原理も持たない集団である。

Axelrod タイプ集団は筆者の一連の実験で使用したものであり、ここでの詳細は省略する<sup>6)</sup>。この集団に属する各個体は、ゲームの履歴を数回分記憶している「記憶領域」と、“C”と“D”が並んでいる「戦略領域」を保持している。

記憶領域の長さを「記憶の長さ ( $L$ )」と呼ぶ。ゲームの履歴によって形成される“C”と“D”の並びを、それぞれを2進数の“0”と“1”に対応させ、履歴を数ビットの2進数と読んで10進数に変換する。10進数に変換された数値は、戦略領域の中でその個体が次のゲームでとる行動を指し示す。

このタイプの集団は、過去数回のゲームの記憶によって確実に自分の行動を定める行動原理を持っている。ゲームの歴史を間違えて覚えることはなく、行動を間違えることもない。この点で Axelrod タイプの個体は上述の Nowak & Sigmund タイプの個体よりもより高度な行動原理を持つ。

## 2 シミュレーション

### 2.1 概要

上述のそれぞれの集団を相互に対戦させる。どのタイプの集団も、個体数は50とし、Axelrod タイプ、Nowak & Sigmund タイプのGAは、交叉確率0.25、突然変異確率0.001をもちいる。また、次世代の個体が生成される際の記憶の初期値は前世代の親から引き継がれるものとする。その意味ではラマルクタイプの進化を想定していることとなる。

集団からランダムに選ばれた個体はくり返し囚人のジレンマゲーム<sup>7)</sup>を行い、平均利得を個体の利得とする。利得が高い個体はより高い確率で子孫を残

---

6) 個体行動決定のしくみ自体は Axelrod (1987) を参照。記憶の長さとの関係は安田俊一 (2004) を参照のこと。

7) ゲームの利得行列およびゲームのくり返し回数の決定方法はこれまで筆者が使ってきたものと同じである。

すことができる。その一方で次世代への遺伝に際しては「交叉」「突然変異」がおこり、親の世代で優秀であった遺伝子を単にコピーするのではなく、より優秀な遺伝子の新たな創造を含んだ進化が起きる。

集団のメンバー全てがゲームを終えて、次世代に遺伝子を残すまでを1世代とし、500世代GAを1回とした実験を1,000回繰り返す。

注目するデータは前著と同じである。以下に簡単に説明する。

**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。連続した10世代の中で、集団の平均利得が2.9を上回った世代が5世代以上表れた場合を協力への収束と定義する。

**裏切りへの収束回数 ND** 裏切りへの収束は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。

**集団利得平均  $\bar{Q}$**  「**集団利得 ( $Q$ )**」を「一回の実験(500世代GA)で得たその集団の平均適合度」とする。集団が協力をより多く、より長く進化させた場合はこの値は3に近くなり、裏切りを進化させれば1に近くなる。集団利得平均  $\bar{Q}$  は1,000回実験での集団利得の平均値である。

**最大分散平均  $\bar{V}$**  第 $n$ 世代での集団の利得分散 $v^n$ 「**世代集団分散**」と呼ぼう。

1回の実験(500世代GA)での世代集団分散の最大値を全実験で平均した値を「最大分散平均」と呼ぶ。1実験中での最大世代集団分散は、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。

**戦略領域の個体数変化** Nowak & Sigmund タイプ集団の対戦では、各戦略領域に発生する個体数変化が重要である。特に「互惠主義者(領域4)」「非協力者(領域2)」の個体数変化に注目し、それぞれの領域での個体数と集団間の協力との関係を分析する。

## 2.2 Axelrod Type vs. NS Type

Axelrod Type 集団と Nowak & Sigmund Type (以下、「NS Type」と表記) 集

Table 1 : Axelrod Type と NS Type

	$(\bar{Q}_A, \bar{Q}_N)$	$(V_A, V_N)$	NC	ND	$(\bar{Q}_A \neq \bar{Q}_N)$
L = 2	1.359, 1.506	1.148, 1.509	161	923	267
L = 3	1.819, 1.848	0.940, 0.990	273	718	452
L = 4	2.117, 2.115	0.773, 0.646	301	324	635
L = 5	1.781, 2.252	0.669, 0.479	111	59	842

団の間でのゲーム結果を Table 1 に示す。

Axelrod Type では記憶の長さの影響があるため、 $L = 2, \dots, 5$  についてそれぞれ実験を行った。

$\bar{Q}_A, V_A$  が Axelrod Type 集団の値、 $\bar{Q}_N, V_N$  が NS Type 集団の値である。

なお、右はしに  $\bar{Q}_A$  と  $\bar{Q}_N$  が同じであるかどうかの検定結果を示してある。

Axelrod Type 集団の記憶の長さ、 $L = 5$  はそれ以下の記憶の長さの集団と比較して特別であるようにみえる。これは記憶の長さが異なる Axelrod Type 集団での実験をおこなった安田俊一（2004）での結果と似ていて、記憶が長い集団は、それが短い集団と比較して集団の平均利得が低くなり、記憶が長い集団との対戦では NC は増え、ND は減少する。

記憶の長さが長くなるにつれて Axelrod Type 集団の平均利得は上昇するが、それに応じて NS Type 集団の平均利得も上昇している。いずれのケースでも NS Type 集団の平均利得の方がごくわずかではあるが Axelrod Type 集団の平均利得よりも高いが、その差は記憶の長さが長くなるにしたがって縮まるようにみえる。しかし  $L = 5$  では再び NS Type 集団の平均利得の方が高くなっており、しかもその差は大きくなっている。

$L = 2$  の Axelrod Type 集団と NS Type 集団との平均利得の推移、およびこのときの NS Type 集団での戦略構成推移を Fig. 2 に示す。これは両集団が裏切りへ共進化した例である。おなじ実験中に協力解へ共進化した例を Fig. 3 に示す。また、協力、裏切りどちらへも共進化がみられなかったケースを Fig. 4 に示す。

つづいて NS Type 集団の戦略領域変化をみよう。

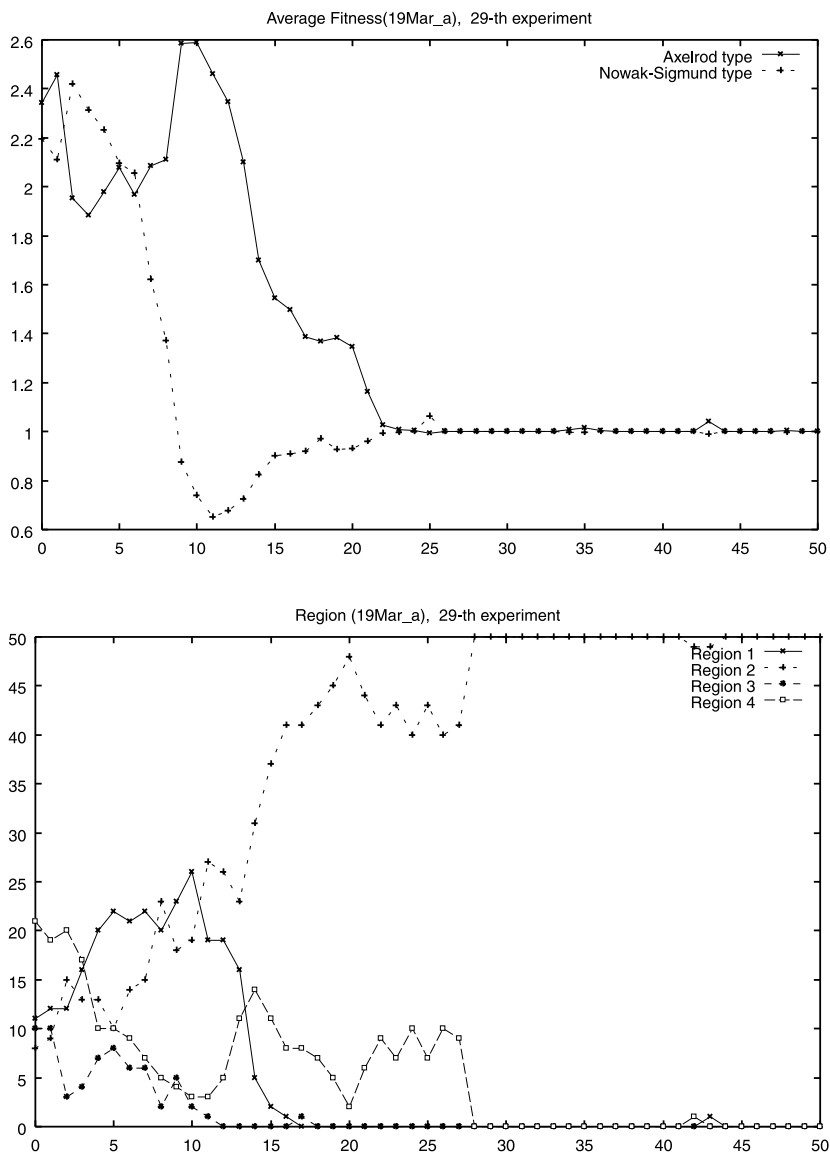


Fig. 2 :  $L = 2$  における裏切りへの共進化（上：平均利得，下：戦略変化）



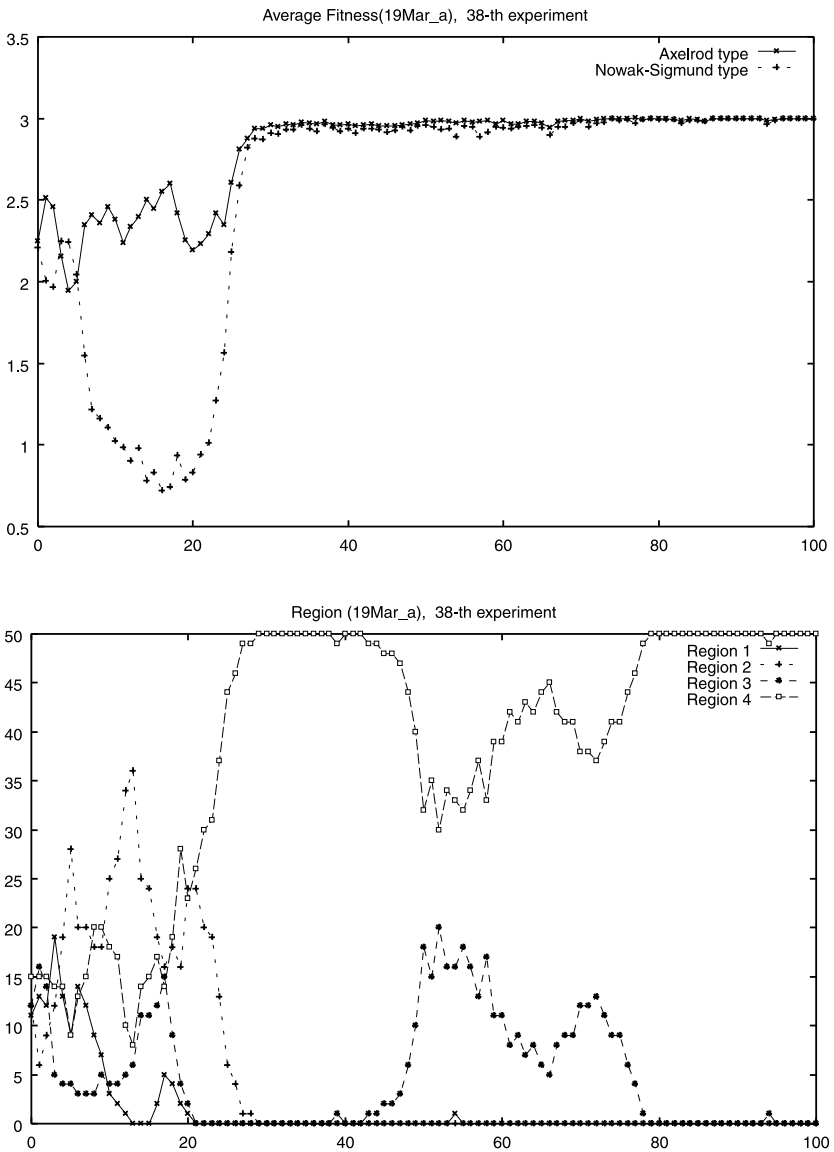


Fig. 3 :  $L = 2$  における協力への共進化 (上：平均利得, 下：戦略変化)

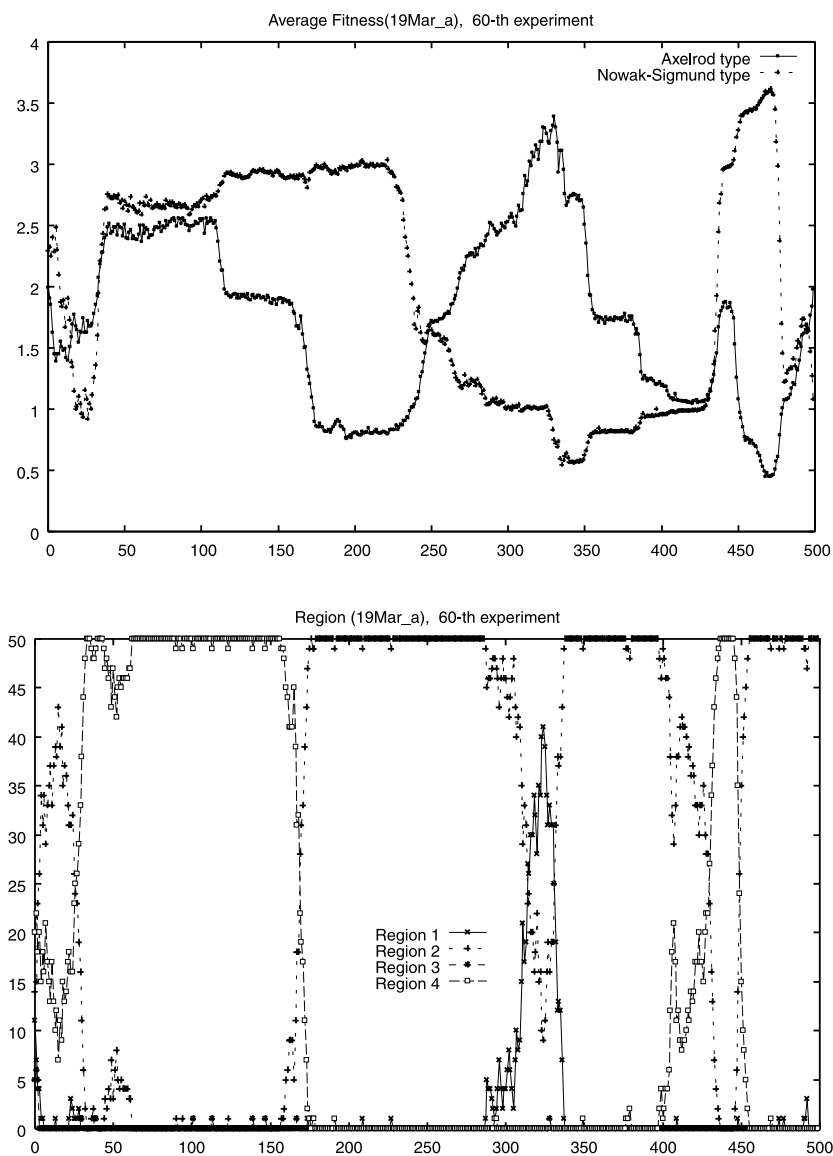


Fig. 4 :  $L = 2$  共進化がみられないケース (上: 平均利得, 下: 戦略変化)

裏切りへの共進化が起きている場合 (Fig. 2) では、NS Type 集団の平均利得は、領域 2 (非協力者) の戦略をとる個体数の増加にしたがって低下。最終的にはすべての個体が領域 2 の戦略を進化させている。同時に 15 世代までの領域 1 (あまのじゃく) 戦略者の増加は、その間の Axelrod Type 集団の平均利得を引き下げているようにみえるが、これはむしろ領域 2 での個体増加に対応したものと考えられる。したがって、NS Type 集団が「裏切りのな」戦略へ進化したことに対応して Axelrod Type 集団もそれに適応し、結果として裏切りへの共進化が実現していると考えてよい。

協力への共進化が起きているケース (Fig. 3) では、25 世代以降の協力への共進化が発生する場面で領域 4 (互惠主義者) が支配的になる。またそのあいだ領域 3 (お人好し) も若干数を増やす局面 (45 世代から 80 世代あたり) もみられる。一方領域 1, 領域 2 はほとんど発達しない。このことは、NS Type 集団が「礼儀正しい」戦略を進化させていることを意味する。また、20 世代あたりまでの領域 2 (非協力者) の一定量は NS Type 集団の平均利得低下と相応しているようにみえる。

協力へも裏切りへも収束が見られないケース (Fig. 4) では、領域 2 (非協力者) と領域 4 (互惠主義者) の間で戦略の発展が交互に起きている。およそ 320 世代あたりを中心としたわずかな期間をのぞいては領域 1, 3 には個体がほとんどあられない。このことは NS Type 集団が「報復的」な戦略を進化させていることを意味している。また、若干のずれはあるものの、ここでも領域 2 (非協力者) の発展は NS Type 集団の平均利得を減少させているようにみえる。

NS Type 集団が Axelrod Type 集団を搾取している<sup>8)</sup> ケースが Fig. 5 である。NS Type 集団は最終的にすべての個体が領域 2 (非協力者) の戦略を進化させ

---

8) ある集団で裏切り戦略が支配的になっている状況で他方の集団がそれに適応してやはり裏切り戦略を進化させれば裏切りへの共進化がおこるが、一方の集団でうまく適応できずに一方的に利得が低下する場合を「搾取」と呼ぶ。安田俊一 (2004) 参照。

たが、Axelrod Type 集団はその戦略にうまく対応できず搾取されている。このときの Axelrod Type 集団の平均利得は 1.5 であるため、裏切り戦略をとる NS Type 集団に対してランダム集団としてふるまっていることがわかる。

ここでも 150 世代から 270 世代あたりでの Axelrod Type 集団の平均利得の上昇と NS Type 集団での領域 4（互惠主義者）の発展が対応している。

“搾取”にまではいたらないものの Axelrod Type 集団が NS Type 集団の利得を上回った形で推移したケースが Fig. 6 である。このとき NS Type 集団では領域 2 はほとんど発達せず、領域 1 と領域 3 が交互に成長している。このことは NS Type 集団がより「寛容的」な戦略を進化させていることを意味している。

ここまでの観測をまとめると以下ようになる。

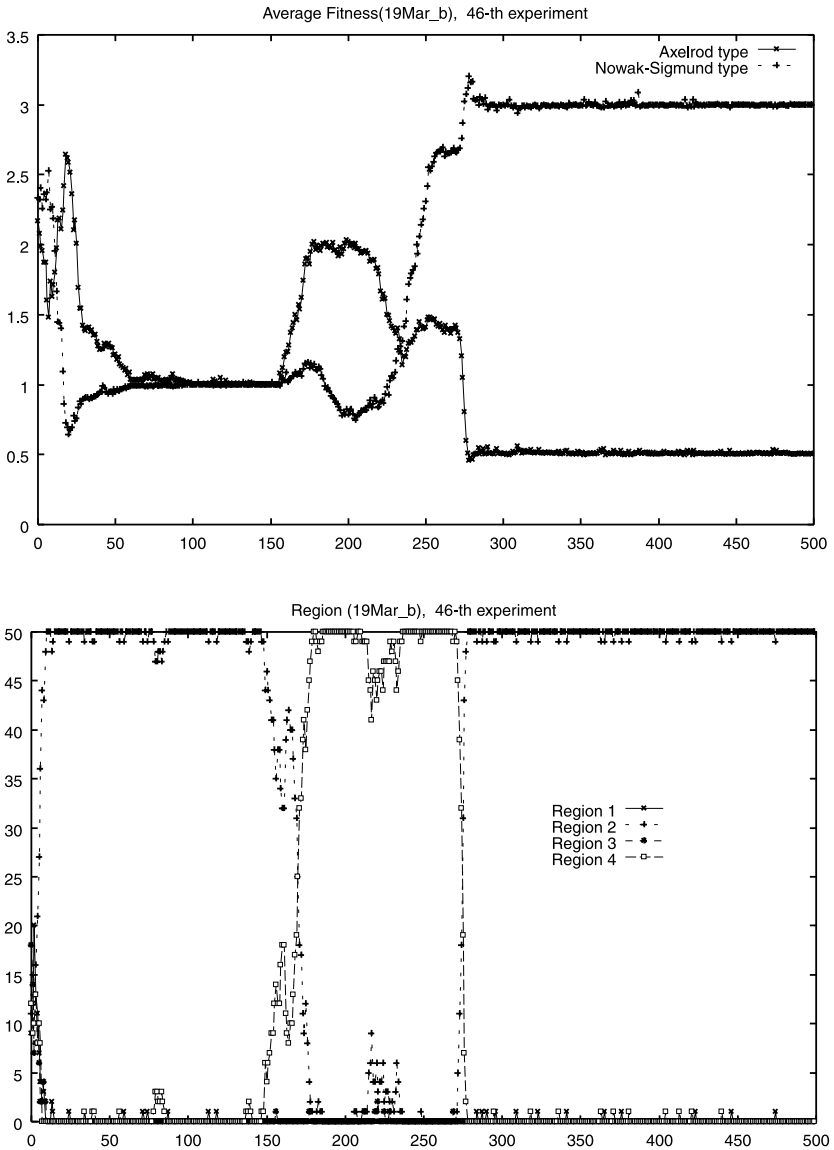
- (1) 裏切りへの収束、もしくは NS Type 集団による Axelrod Type 集団の搾取が起こる場合、NS Type 集団は領域 2（非協力者）へ進化する。
- (2) 協力への収束が起こっている場合は NS Type 集団において領域 4 の個体（互惠主義者）が支配的となる。
- (3) NS Type 集団が「報復的」な戦略を進化させている場合、協力へも裏切りへも共進化がみられない傾向がある。
- (4) Axelrod Type 集団の平均利得が NS Type 集団のそれを上回っているケースでは NS Type 集団は「寛容的な」個体が支配的となっている。

### 2.3 Random タイプとの対戦

つづいて、まったく遺伝的な機構をもたず、過去のゲームに対する記憶も一切持たない集団を取り上げる。この集団は現在の行動を決める原則がなく、経験からの学習をまったく行わないタイプの集団と考えてよい。

こういった集団を Random Type と呼んでおこう。

Random Type 集団と Axelrod Type 集団の対戦をシミュレートした結果が Table 2 である。 $\overline{Q}_A$ ,  $V_A$  が Axelrod Type 集団に関する値で、 $\overline{Q}_R$ ,  $V_R$  が Random Type 集団に関する値を示している。ここでも Axelrod Type 集団については記



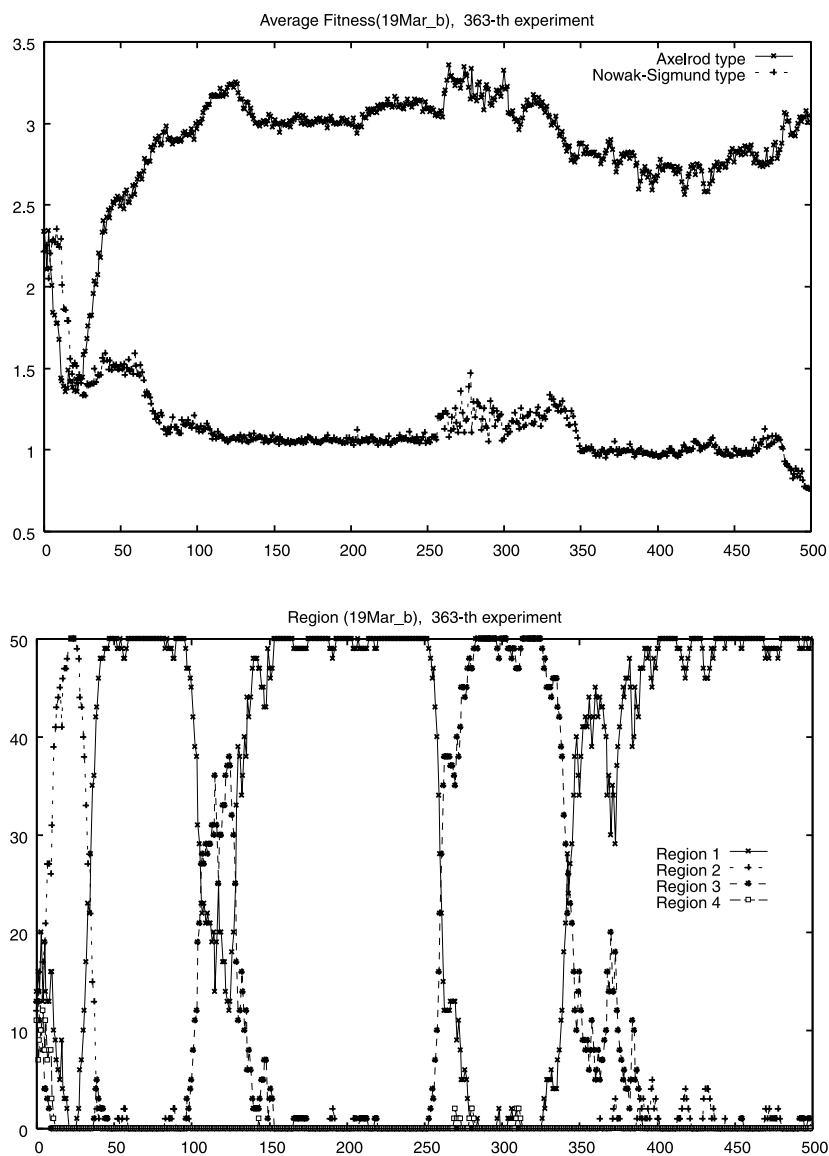


Fig. 6 :  $L = 3$  Axelrod 集団が優位 (上 : 平均利得, 下 : 戦略変化)

憶の長さの違い別にシミュレーションを行っている。

Table 2 : Random 集団と Axelrod Type 集団

	$(\bar{Q}_A, \bar{Q}_R)$	$(V_A, V_R)$
L= 2	(2.990, 0.524)	(0.147, 0.654)
L= 3	(2.952, 0.614)	(0.089, 0.494)
L= 4	(2.709, 1.187)	(0.062, 0.131)
L= 5	(2.350, 2.030)	(0.047, 0.062)

この対戦の場合、協力・裏切りどちらへも共進化は起こらず、ほとんどのケースで Axelrod Type 集団は3に近い平均利得をあげる。これは Axelrod Type 集団が Random Type 集団の行動に対してほぼ完全に適応していることを意味する。つまり Axelrod Type 集団は All-D 戦略を進化させた。しかし Table 2 をみると記憶の長さの違いはここでも集団の平均利得に明白な違いをもたらしており、一見したところ記憶の長さが長くなるにつれて Axelrod Type 集団の平均利得は低下、Random Type 集団の平均利得は上昇。Axelrod Type, Random Type 集団ともに集団分散は低下する傾向がみられるが、これは“平均のマジック”とも言うべきものである。

Fig. 7 は  $L=2, 5$  のケースでの典型例をプロットしたものである。これをみれば  $L=5$  のケースでは、Axelrod Type 集団が Random 集団に適応するのに時間がかかっていることがわかる。したがって、500 世代という限られた範囲では、到達しうる最高平均利得である3へ至る以前の利得が含まれるため、平均利得が低下する。特にこのケースでは  $L=5$  の場合は500 世代まででは完全には適応できていない。

9) この点、安田俊一（2004）では“染色体が長い集団はそれが短い集団に対してランダムに振る舞う”との仮説を結論として導いたが、これは間違っている可能性がある。しかし、前節の NS Type 集団との実験結果からみると、記憶が長くなるにつれて協力への収束回数 NC は単に“染色体が長いため、最適な戦略を進化させるのに時間がかかる”と言いきれるものでもない。

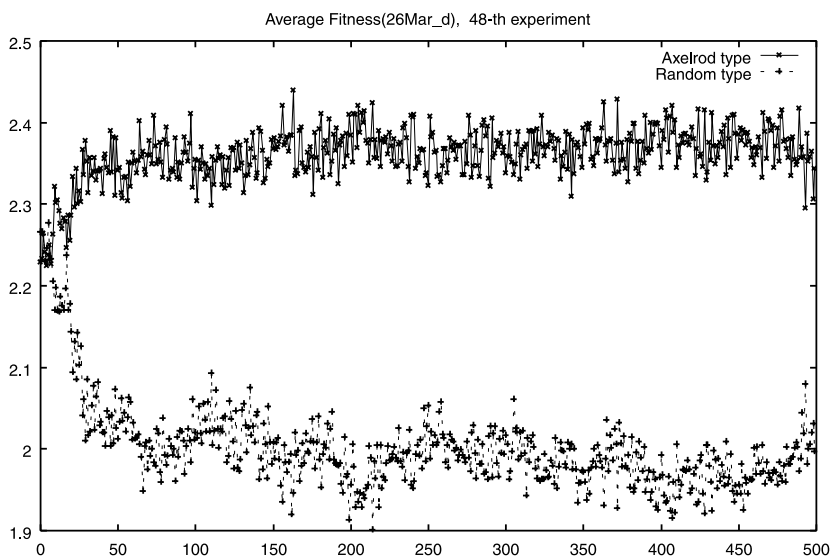
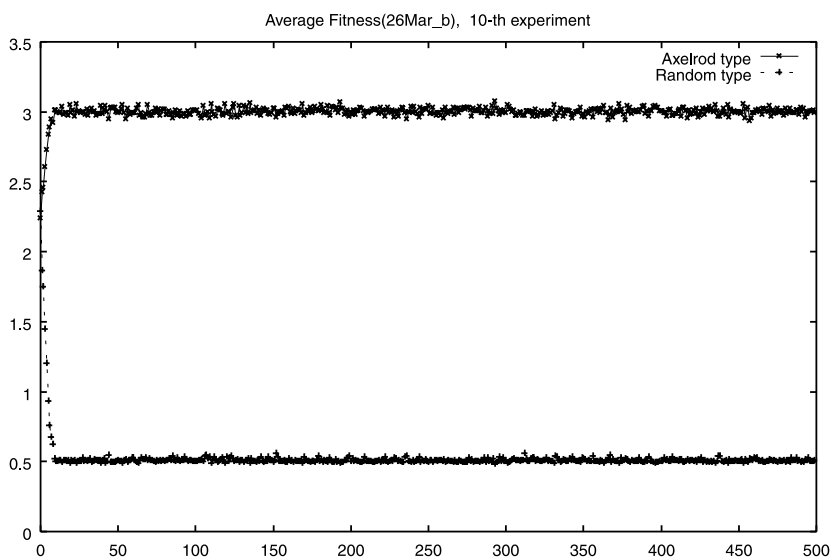


Fig. 7 : Axelrod Type vs. Random Type (上 :  $L = 2$ , 下 :  $L = 5$ )



続いて、Random Type 集団と NS Type 集団との対戦を観察しよう。Table 3 がその結果である。 $\bar{Q}_N$ ,  $V_N$  が NS Type 集団の値を示す。

Table 3 : NS Type 集団と Random Type 集団

$(\bar{Q}_N, \bar{Q}_R)$	$(V_N, V_R)$
(2.959, 0.600)	(0.124, 0.543)

この二つの集団での対戦でも Random 集団は完全に打ち負かされる。そのようすは Axelrod Type 集団とほとんどかわらない。

ここでは遺伝機構を持っているという NS Type 集団の強みがはっきりと表れている。行動が確率的で不安定であっても、ランダムな集団に対しては完全に適応し、最適な戦略 (All-D 戦略) を進化させている。

以上からわかることは、NS Type 集団のように記憶も短く (NS Type 集団は 1 回前の相手の行動しか覚えていない)、行動も不安定な集団でも、遺伝機構を持っていて、状況に適応できる戦略を進化させることができるような行動原理を持つ集団は、行動原理をまったくもたない集団を完全に搾取することである。

### 3 結 論

今回のシミュレーションでは、行動原理が根本的に異なる集団間での囚人のジレンマゲームから、いくつか特徴的な結論を得た。

Axelrod Type 集団と NS Type 集団との対戦は、どちらも一貫した行動原理と遺伝機構 (学習機構) を持っており、原理から導かれる行動が確率的か決定的かとの点が異なる集団の対戦である。この場合、決定的な行動をとる集団 (Axelrod Type 集団) の利得は、不安定 (確率的) な行動をとる集団 (NS Type 集団) がどのような戦略を進化させていくかに依存する。

不安定な行動をとる集団が遺伝 (学習) によって、「礼儀正しい」戦略を進化させれば両集団は協力へ共進化した。その集団が「寛容的な」戦略を進化さ

せる場合は、決定的な行動をとる集団が比較的高い利得をあげている。

他方、不安定な行動をとる集団が「報復的」な戦略を進化させれば両集団の平均利得は不安定な軌跡をみせる。協力への共進化も裏切りへの共進化も見られない。また、「裏切り」戦略が進化した場合は、決定的な行動をとる集団がそれに完全に適応した場合は裏切りへの共進化が見られ、適応が不完全であった場合は決定的な行動をとる集団が搾取されることになる。

本稿ではシミュレーションを行っていないが、安田俊一（2001a）および同（2001b）では、Tit-For-Tat（TFT）戦略者と Axelrod Type, NS Type 集団とのシミュレーションを行っている<sup>10)</sup>。そこでの結論は、Axelrod Type 集団も NS Type 集団も、TFT 戦略者と対戦した場合は協力への収束があきらかに増大することであった。

今回のシミュレーションの文脈でいえば、TFT 戦略は「礼儀正しく・報復的」であることを意味する。そしてその行動原理は一貫しており、行動は決定的である。

上の結論から考えると、TFT 戦略者がもつ「礼儀正しさ」が、Axelrod Type 集団、つまり行動が決定的である集団の利得をあげることで協力の方向へ進化を促し、「報復的」であることが、NS Type 集団、つまり行動が不安定である集団に対して遺伝（学習）機構を通じて協力への進化を促したという解釈ができる。

Random Type 集団と対戦は遺伝（学習）機構を持っている集団とそうでない集団との対戦である。

ここでの結論は明白で、遺伝（学習）機構をもたない集団との対戦では協力への共進化は一切おこらず、遺伝（学習）機構を持った集団は「常に裏切る」という戦略を進化させることで、それをもたない集団を完全にうち負かすことである。ただし、上で紹介した TFT 戦略との対戦に関する過去のシミュレー

---

10) TFT は「しつぺ返し戦略」。最初に“C”を出してあとは相手の1回前の行動を真似る戦略。本稿でのシミュレーションと条件がかなり異なるため、詳細は省略する。

ション結果からは遺伝（学習）機構を持つかどうか、という問題よりは行動に一貫性がない（ランダムであること）が、今回のシミュレーション結果をもたらしていることは間違いない。したがって、遺伝（学習）機構をもった集団は対戦相手の行動がどのようなタイプに一貫性を持つかに対して適応する。

このことは遺伝（学習）機構をもった集団に対して協力への進化を促す手段を示唆している。この点の検討は次回への課題としたい。

### References

- 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.
- Axelrod, R.(1997). *The Complexity of Cooperration*. Princeton University Press.
- Nowak, M. and K. Sigmund (1992, January). Tit for tat in heterogeneous population. *Nature* 335, 250-253.
- 安田俊一 (2001a)。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。
- 安田俊一 (2001b)。RPD における戦略の進化ーGA による囚人のジレンマ実験(2)ー。**松山大学論集** 13(3), 27-43。
- 安田俊一 (2004)。異集団による囚人のジレンマ。**松山大学論集** 15(6), 1-17。