

# RPD における戦略の進化

## —GA による囚人のジレンマ実験(2)—

安 田 俊 一

### 0 はじめに

筆者は前著で、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms, 以下 GA) では「遺伝的な戦略パターン」の検出が困難であることを指摘した (安田俊一 (2001)。以下「前著」)。Axelrod (1987) が用いた方法では染色体の長さが長く、遺伝子型が示す戦略パターンも長くなるため交叉によって破壊されやすい。したがって Tit for Tat (しっぺ返し戦略: 以下 TFT) のように理論的には明確なパターンを示す戦略であっても、それを検出することは難しいのである。

さらに、この方法で定義された染色体は個体がとりうるすべての戦略についての情報を持っているとはいえ、それを簡潔に要約するには記述に必要な空間が広すぎる<sup>1)</sup>

したがって、どのような戦略がどのように進化するのかを分析するためには Axelrod の方法とは違ったやり方で遺伝的な戦略パターンを表現する必要がある。

本稿では Nowak & Sigmund (1992) の手法に GA を組み込むことによって「戦略の進化」を分析することを目的とする。

前著で指摘したように繰り返し囚人のジレンマ (Repeated Prisoner's Dilemma, 以下 RPD) の研究方向は理論的な解概念の精緻化へ向かったため、

---

1) 簡単に言えば、1 個体を戦略空間の中の 1 点に位置づけようとするれば、Axelrod の方法では 64 次元空間が必要になる。

どのような戦略がどのような過程で進化するのかという問題にはほとんど関心が向けられていなかった。

その理由は2つある。

第1はフォーク定理の示すところでは無限繰り返しゲームにおいては「協力解」を含むあらゆる解が Nash 均衡として現れる<sup>2)</sup>一方で、進化的に安定な戦略 (Evolutionarily Stable Strategies: ESS) は RPD では存在しない<sup>3)</sup>ことから、フォーク定理で得られる複数均衡解から協力均衡解を選びだすことに注意が向けられたこと。

第2には Axelrod の実験によって TFT があまりに有名になりすぎたので、「TFT が進化的に安定か？」というテーマに関心が集中したため、一般的な戦略の進化の問題、特にその過程にはあまり注意が向けられなかったためである<sup>4)</sup>。

本稿での関心は

- ・ 戦略を簡単な空間上で位置づけ、その性質を特徴づけること
- ・ 遺伝的な進化を通じてそれらの特徴的な戦略がどのように変化するかを観察すること

の2点である。以下では初めに Nowak & Sigmund が定義した「確率的な戦略」を紹介する。続いて本稿で用いる戦略分類を説明した後、シミュレーションモデルを概説し結果を述べる。

シミュレーション結果から、「確率的な戦略」をとる集団は主として「相手の協力に対する態度」の区分に関して不定周期的な変動を繰り返すこと、有性生

2) この点は Axelrod 批判の要点として Binmore (1998) が指摘している点である。あきらかに彼は TFT が一般に強調され過ぎることに不満を表明している。

3) Boyd & Lorberbaum (1987), Farrell & Ware (1989)

4) 本稿で取り上げる手法の基礎である Nowak & Sigmund (1989, 1990, 1992) では初期に設定された様々な戦略をもつ個体数がどのような過程で増減を繰り返すか、あるいは特定の3-4つの戦略間での個体数の増減について言及している。後述のようにこの方法はあくまで初期に設定された戦略の増減に関するものであり、戦略自身がどのように生成され発展を遂げるかという問題ではなく、本稿とは分析の視点が異なる。

殖による遺伝子混合によって集団中の戦略は決して安定しないこと、完全にランダムな状態で行われる RPD では「寛容な戦略」は進化しないが TFT 戦略を外部から与えると集団中に「寛容な戦略」が進化しやすいことが明らかになる。

## 1 確率的な戦略決定

### 1.1 戦略表現

Nowak & Sigmund は RPD を行う個体の戦略を確率的に決定されるものとして想定してシミュレーションを行った。彼らがこのような想定をしたのは動物集団のモデルを強く意識したためである。一般的に考えて、動物は相手の行動を正しく認識できなかつたり、自分の行動が予定されていたものと違っていたりする。したがって決定論的に、すなわちゲームの歴史を正しく認識して予定されている通りの行動をとるようなモデルはふさわしくない<sup>5)</sup>。こういった集団では、プレイヤーが持つゲームに関する記憶は1回しかなく、しかもその行動はせいぜい確率的であると彼らは想定した。

彼らのモデルでは、個体の戦略は3つの実数の組  $(y, p, q)$  によって記述される。

$y$  は「その個体が最初の1回目のゲームで“協力”(C)を選択する確率」である。

$p, q$  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”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”場合に次に自分が“協力”する確率」を示す。

このモデルでは TFT は  $(1, 1, 0)$ 、ALL-C は  $(1, 1, 1)$  (常に“C”を出す戦略)、All-D は  $(0, 0, 0)$  (常に“D”を出す戦略) STFT は  $(0, 1, 0)$  (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) で表される。

彼らはこのモデルを使っていくつかの研究を行っているが、Nowak & Sig-

5) この問題は「ノイズ」の問題として動物集団の場合ばかりではなく、外交問題を取り扱う際に取り上げられる。Axelrod (1997) ch 2 参照。

mund (1992) において、戦略を上よりも簡略化した  $(p, q)$  として「無限 RPD」実験による集団の変化を観察した。

戦略  $(p_i, q_i)$  を持つ個体  $E^i$  と戦略  $(p_j, q_j)$  を持つ個体  $E^j$  が対戦した場合の  $E^i$  の収束期待利得  $A^i(E^i, E^j)$  は

$$A(E^i, E^j) = 1 + 4c_j - c_i - c_i c_j, \quad c_i = \frac{q_i + (p_i - q_i)q_j}{\{1 - (p_i - q_i)(p_j - q_j)\}}$$

となる。<sup>6)</sup>

ランダムに生成された  $(p, q)$  を持つ個体を対戦させ、利得に応じた数だけ次世代に個体数が増えるという replicator dynamics を想定し、集団中の個体の増減を観察する。

それによると、集団は最初は  $(0, 0)$  (All-D) に近い個体が数を増やすが、十分な時間が経つと  $(1, 0)$  戦略 (TFT) が成長する。しかしさらに世代をすすめると最終的には TFT よりも「寛容な」戦略<sup>7)</sup>  $(0.99, 0.33)$  が集団のほとんどを占める。つまり多様な戦略からなる集団において完全な TFT は最終的に進化してくる戦略ではなく、それより寛容な戦略が進化してくることが示された。もちろんこの戦略によって集団中ではほぼ完全な協力が達成される。

## 2 戦略による個体分類

上述の方法の長所は  $(p, q)$  で示される個体の戦略傾向をみることによって、それらがどのような進化をたどるか観察できることである。しかし、Nowak & Sigmund は本質的に固定的な戦略セットを取り扱っているため、戦略傾向の分類を行っていないし集団の進化をその視点から観察はしていない。

6) 囚人のジレンマの利得行列を  $R = 3, T = 5, S = 0, P = 1$  とした場合、また、ここで  $c_{i,j}$  とされているのは、このような確率的戦略を用いた場合の「C」(協力)を出す確率(その収束値)である。無限に繰り返しゲームを行う場合に最終的に協力する確率は一定に収束するのでその場合の期待利得を計算した、ということである。Nowak & Sigmund (1990) 参照。

7) generous tit-for-tat: GTFT。相手が裏切った場合に次回自分が「協力」する確率が、0 より大であるので、「より寛容」である。

個体を平面上の点  $(p, q)$  で表したときに、 $p$  は「相手の前回の協力に対して今回自分が協力する」確率を示し、 $q$  は「相手の前回の裏切りに対して今回自分が協力する」確率を示すから、平面上のどの領域にどの程度の個体がいるかを追跡すれば、集団中の戦略変化を観察することができる。

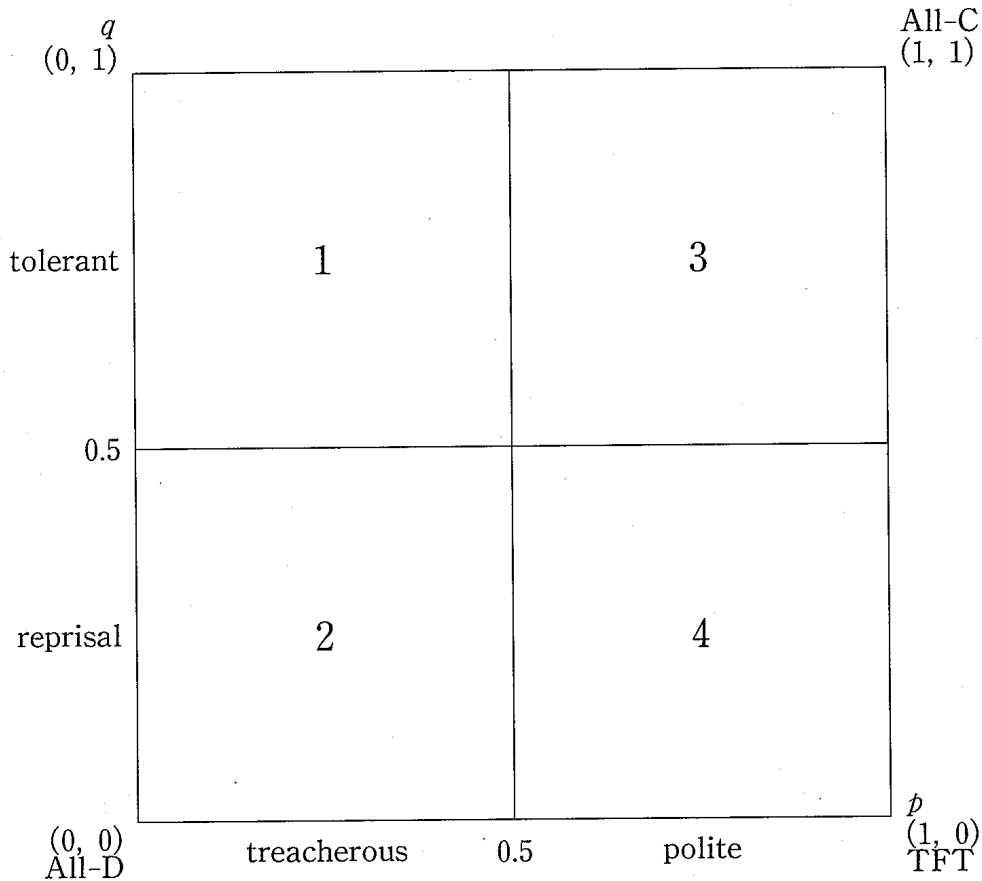


Fig. 1 : 戦略による分類

ここでは長さ 1 の正方形を  $p = 0.5, q = 0.5$  を境界として 4 つの領域に分ける。Fig. 1 で示した領域にある個体は以下のような性質を持っている。

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)」であるといえよう。

そこで4つの領域にある個体をそれぞれ以下のように名付けよう。

**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関わらず裏切る傾向であるので、「**非協力者**」

**領域3**にある個体は前回の相手の手に関わ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、「**互惠主義者**」

Nowak & Sigmund は戦略を初期時点で固定しているので、このような分類は試みられていない。

以下のシミュレーションでは、ランダムに生成された集団の進化がこれら4つの戦略傾向をどのように変化させていくかをみる。

### 3 シミュレーション

#### 3.1 モデル

本稿でのシミュレーションでは「0」「1」からなる長さ20の配列を染色体とし、前半10ビットが「相手が前回“協力”した場合」の行動、後半10ビットが「相手が前回“裏切った”場合」の行動を規定する。

遺伝子型の前半10ビットを2進数と読んでそれに実数  $p$  を、同じく後半10ビットに実数  $q$  を対応させる<sup>8)</sup> 表現型はこの2つの実数の組合わせ、 $(p, q)$  である ( $0 \leq p, q \leq 1$ )。

各個体は前節で述べたように、この表現型と前回の相手の行動に応じて今回の自分の行動を決定する。相手の前回の行動が「C」で（「D」で）あった場合

8) 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。

は、今回のゲームでは確率  $p$  で ( $q$  で) 「C」をとる<sup>9)</sup>

初期時点でランダムに生成された 100 個の個体はランダム対戦で平均 100 回の有限 RPD を繰り返す<sup>10)</sup>。そしてその結果得られたゲームの平均利得を適合度として自然選択にさらされる。選択に際しては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 1 回、親として選択される<sup>11)</sup>。交配は異性生殖とし、2 個の親から 2 個の子が作られるものとする。染色体の交叉確率は 0.25、突然変異率は 0.01 である。

各ゲームにおける行動の決定には「前回の相手の行動」が必要であるので、新世代が最初のゲームを行う場合には「仮の」記憶が必要である。そこで、新世代が生成されるときには親個体の最後のゲームでの記憶がそのまま新世代個体の最初の記憶として引き継がれるものとする。つまり進化は「ラマルクの」である<sup>12)</sup>

### 3.2 集団の振る舞い

GA で繰り返し囚人のジレンマゲームをシミュレートすると、集団中に広まった高い利得をもたらす優秀な遺伝子型も交叉と突然変異によって破壊される。したがって、例えば集団のほとんどが何らかの傾向を取るようになってもいずれそれは破壊される<sup>13)</sup>

9) したがって個体が今回のゲームで「D」を出す確率はそれぞれ  $1-p$ ,  $1-q$

10) 繰り返し回数は平均 100, 分散 20 の正規確率分布から引き出されるので集団が固定的なゲーム回数に適應することはない。それゆえ最後のゲームを知ることによって高い利得をえることはできない。

なお、ゲームの利得構造は前著および Nowak & Sigmund と同じで

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

である。

11) 線形スケーリングを採用した。スケーリングアルゴリズムは Goldberg (1989) によった。

12) ただし、前著で指摘した「遺伝子型と表現型の混乱」を避けるために相手の行動に関する記憶は遺伝子型には含まれていない。この記憶は相手の行動に関するものなので「C」か「D」という 1 文字であり遺伝子型とは型が合わない。

13) 前著を参照のこと。

この遺伝子型の成長と崩壊は「協力の進化と崩壊」を意味する。前著のシミュレーションでも顕著に現れたこの過程は確率的な戦略をもちいた今回のシミュレーションでもはっきりと現れている。

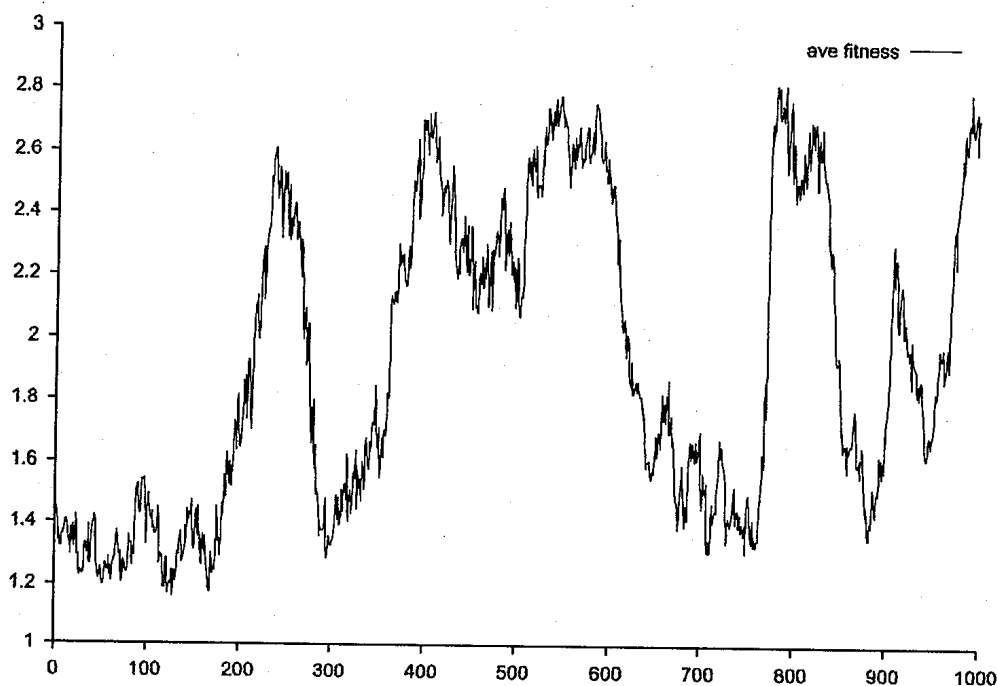


Fig. 2 : 平均適合度の推移

Fig. 2 は集団の平均適合度を世代毎にプロットしたものである。すぐにわかるように、平均適合度は細かな変動を起こしながら循環する。

この循環の過程は集団が領域 1-4 を移り変わることに対応している。Fig. 3 は、「非協力者」(領域 2)と「あまのじゃく」(領域 1) (上図)、「互惠主義者」(領域 4)と「お人好し」(領域 3) (下図) が集団中に占める割合を世代毎にプロットしたものである。世代の経過にともなって各領域が増減を繰り返している。

このとき「互惠主義者 (領域 4)」が増えると集団の平均適合度は 3 に近くなり、「非協力者 (領域 2)」が増えるとそれは低下して 1 に近くなる。

4 つの領域にある個体が対戦したとき、「お人好し」は「非協力者」と「あまのじゃく」に打ち負かされる (対戦相手の利得を高め、自分の利得は低い) の



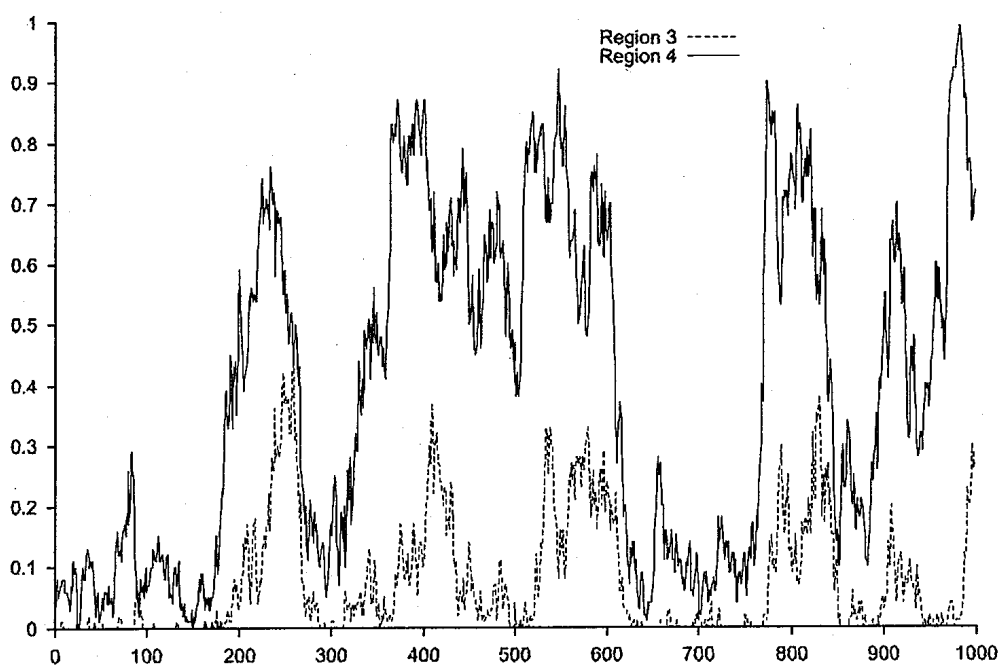
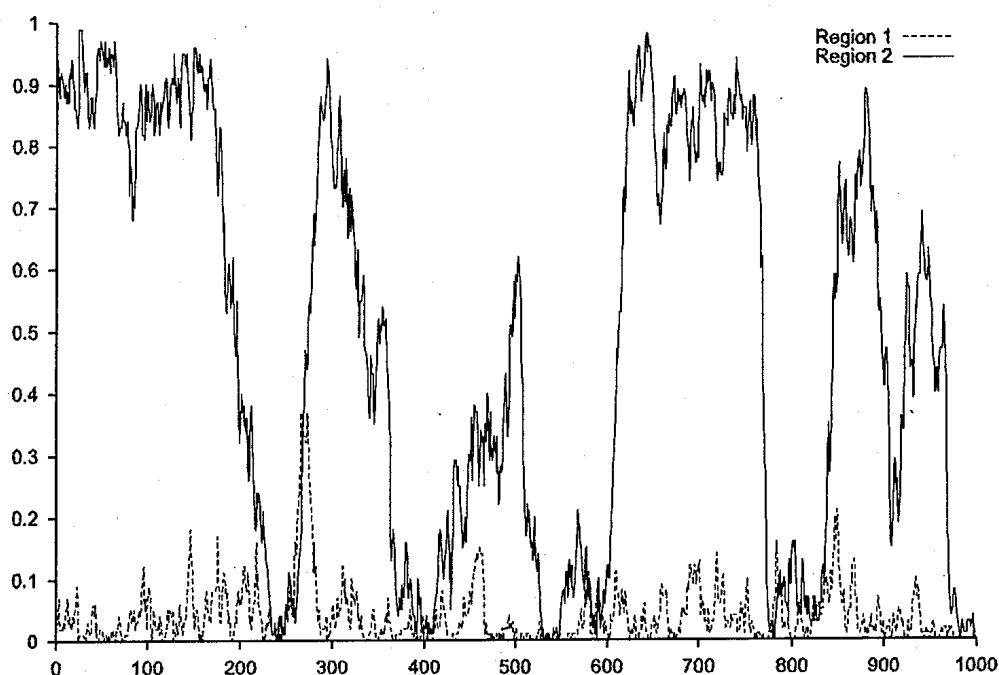


Fig. 3 : 領域別個体比率推移

で適合度は低下し、次世代に淘汰されやすい。逆に「非協力者」と「あまのじゃく」は適合度をあげ、その遺伝子は集団中に拡大していく。ところが「あまのじゃく」は「非協力者」には完全に打ち負かされる。というのは「非協力者」

が一貫して「D」を出しやすいのに、「あまのじゃく」はそれに対して「C」を出してしまうからである。ちょうどこの対戦では「あまのじゃく」は「お人好し」と同じようにふるまう。他方「互惠主義者」は「非協力者」との対戦においては低い利得しか得ることができないが、「あまのじゃく」と「お人好し」との対戦では高い利得を得るのでやはり生き残りやすい。Fig. 3から容易に見て取れるように「非協力者」と「互惠主義者」(領域2, 4)が集団中で大きな割合を占め、「あまのじゃく」と「お人好し」(領域1, 3)はごくわずかの割合しか占めることがないのはこういう理由である。

領域1, 3にあまり個体が発生しないということは、「寛容」な個体が発生しにくい、あるいは発生しても集団に広まることがない、ということを示している。集団は「報復的」な戦略傾向を進化させるのである。

領域2, 4は交互に成長と衰退を繰り返す。これらの領域はほぼ反対向きに循環し、一方の領域が成長している段階では他方は衰退しており、続いてその成長がとまって衰退を始めると他方が成長を開始する。

このことは、集団の戦略傾向は主として「“裏切りの”か“礼儀正しい”か」の間で交互に揺れ動くのが基本であり、「“報復的”か“寛容”か」という間での動きは少ないことを意味している。したがって、戦略進化の基本となっているのは「前回相手が協力した場合」の態度であって「前回相手が裏切った場合」の態度は「報復的」な傾向が強く、それはそう大きく変化しない。

Fig. 4は集団の平均適合度が3に近い場合の集団の様子をプロットしたものである。このときほとんどの個体が( $p \approx 0.99$ ,  $q \approx 0.07$ )に集中している。この図の原点は(0.4, 0)であるから、この場合領域3, 4にほとんどの(領域1にある左上3個体を除いて)個体が集中していることになる。そしてその中でも「互惠主義者」の割合が非常に高い。完全なTFT( $p = 1$ ,  $q = 0$ )に近い個体によって集団が構成されている。

しかし進化過程はこのまま収束はしない。確率的な戦略ではエラーが起こりうるからである。

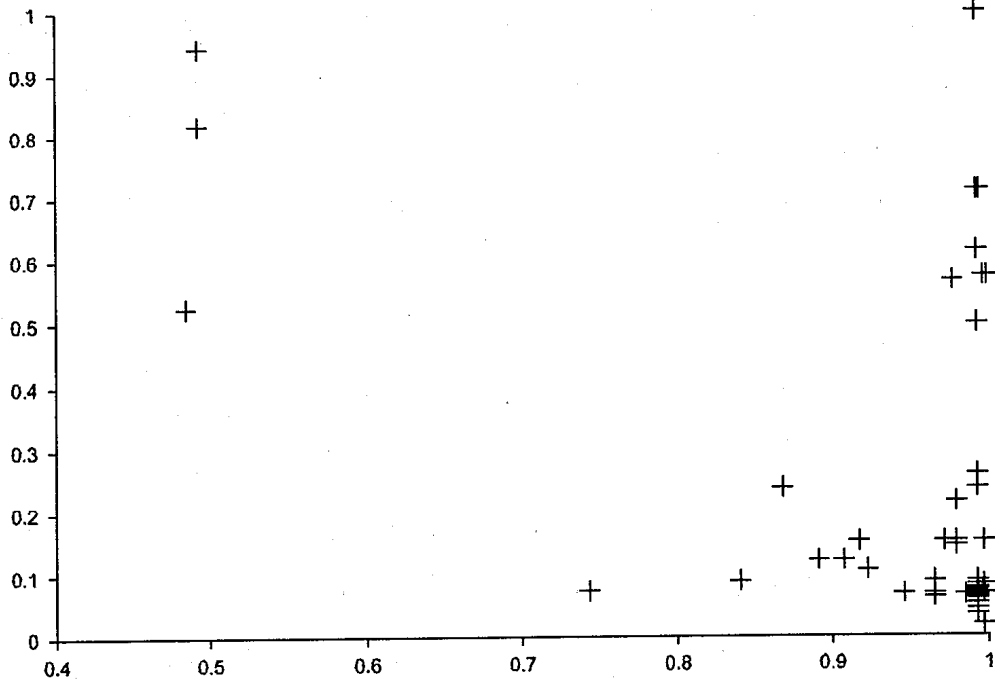


Fig. 4 : 互惠主義者への集中例

集団の大多数を占めている TFT (に近い戦略) 同士の対戦においてエラーは決定的である。TFT 戦略者のどちらかが確率的なエラーによって「C」ではなくて「D」を出してしまうと次にエラーが起こるまで完全な「裏切りの応酬」が起こることになる。そういう個体は最終ゲームでの記憶「D」を次世代に引き継ぐので (ラマルクの進化), 次世代は「完全な裏切り」からゲームに突入することになってしまう確率が高い。こうして TFT 戦略に近い「互惠主義者」集団がエラーによって利得を下げている一方で, GA の突然変異過程によって発生する「非協力者 (領域 2)」は, 領域 3 にある「お人好し」との対戦で高い適合度を得ることができる。それゆえ集団中に生き残りやすい。またそれに加えて GA の交叉過程が染色体の混合によってまったく新しい戦略を産み出すため, 「近」TFT からなる「互惠主義者」集団の崩壊は止まらない。

こうして集団の「互惠主義者」への集中は長続きしない。そしてこの領域への集中が崩壊すると, 集団の平均利得は減少していく。それは「非協力者」の集団内での拡大を意味しているが, 「非協力者」へ集中しても集団がそのまま収

束することはない。「非協力者」同士の対戦では互いに低い適合度しか得られない一方で、突然変異やエラーによって、より寛容でより協力的な個体が発生した場合、今度はそれが成長を始めるからである。

こうして集団は「協力の進化と崩壊」を繰り返すのである。

### 3.3 TFT 環境の影響

この集団に外部から TFT を与えてやると、集団の進化は興味深い変化を示す。

以下のシミュレーションでは、TFT 戦略者 ( $p = 1, q = 0$ ) を固定的に与え<sup>14)</sup> それとの対戦確率 (これを「TFT 濃度」と呼ぼう)、を 5% 刻みであげていく。それぞれの濃度で 1000 世代 GA を 100 回繰り返し、1 回あたりの繰り返して各領域が 80% 以上の集中度を示した世代数を観察する。

Fig. 5 はそれを示したものである。縦軸は世代数、横軸は TFT 濃度。TFT 個体がない (濃度 0) の場合、「非協力者」(図中 Region 2) は 1000 世代中平均約 450 回の集中を示している。

TFT 濃度が上がるにつれて「非協力者」が集団中に集中する回数は低下していき、それに代わって「互惠主義者」(図中 Region 4) への集中が起りやすくなる。

ここまでの過程は Nowak & Sigmund (1992) の結論と同じである。TFT 濃度の上昇 (TFT 個体の増加と同じ意味である) は「非協力者」の成長から「互惠主義者」の成長へ切り替わっていく。

ところが TFT 濃度が 50% を超えた辺りから、集団が「お人好し」(図中 Region 3) に集中する回数が増加していく<sup>15)</sup> つまり「互惠主義者」よりももっと寛容な戦略傾向が集団中で成長しやすくなるのである。

14) TFT 個体は GA 過程にははならず、全世代で存在する。

15) 「あまのじゃく」領域への集団の集中はほとんど見られないため、グラフでは割愛している。

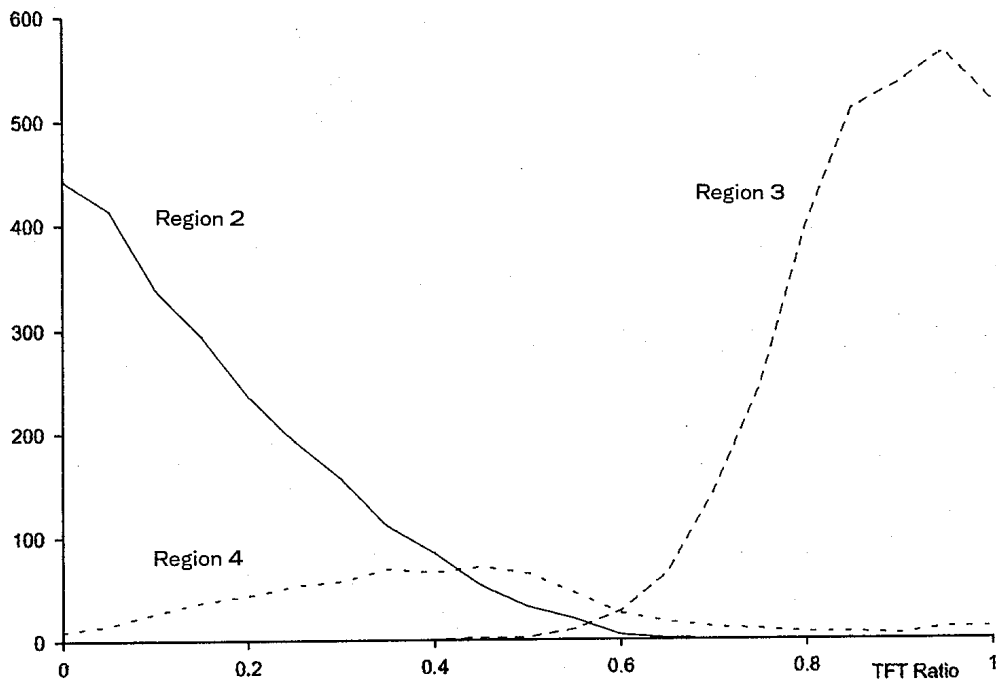


Fig. 5 : TFT 濃度と各領域への集中

これは重要な示唆を含んだ現象である。

前著において、外生的に TFT 環境が与えられると集団は TFT に進化する傾向があることを指摘したが、その根拠になったのは「記憶パターンからみた TFT」であった。

「完全な協力」3 回分の記憶パターン「CCCCCC」によって示される「戦略領域」の指定個所は最初の第 0 ビットだけであるため、実質的には残りの染色体は行動の決定に何らの影響ももたらさない。したがって、「CCCCCC に対して C」というパターンは TFT でも All-C でも共通しているのであるから、「記憶パターン」からだけでは両者を区別することができない<sup>16)</sup>

したがって、TFT でも、それより All-C に近いパターンでも、Axelrod 式の戦略表現では区別がつきにくい。

16) もちろん、Axelrod 方式での理論的に完全な All-C 戦略の染色体は 64 ビットすべてが C であることだが、そこでの戦略決定では記憶パターンが完全な協力である場合には第 0 ビット以外の遺伝子座はまったく使用されない。前著を参照のこと。

今回のシミュレーションが示しているのは Axelrod が結論づけた「CCCCCC に対して C」戦略が「TFT である」とする主張に疑問を投げ掛ける。ここでの結果からは、Axelrod のシミュレーションにおいても TFT より寛容な戦略が進化してきた可能性を示唆している。

また同時に、このシミュレーション結果は Nowak & Sigmund の結論にも疑問を投げ掛ける。彼らの結論の「TFT よりも寛容な戦略 (GTFT) が成長する」という部分はここでのシミュレーションと同じであるが（「お人好し」は「互惠主義者」よりも寛容である）、彼らのシミュレーションが示した「GTFT」という戦略はここでの「互惠主義者」の領域にある。ここでのシミュレーションが示すのは、より「寛容な」戦略 ( $q \geq 0.5$ ) への集中である。

「お人好し」は TFT 及び同じ戦略との対戦では「完全な協力」を非常に実現しやすい。したがって、TFT との対戦確率が増えるとそれらは高い適合度を得るため集団中に拡大しやすいのである。

他方で「お人好し」は上述のように「非協力者」と「あまのじゃく」との対戦では完全に打ち負かされてしまう。

Nowak & Sigmund の手法では戦略が固定されているために、どの世代においても他のあらゆる戦略との対戦にも可能性が残されている。個体数は少なくなっても戦略自身が無くなってしまいうけではないからである。そのような環境では、依然生き残っている「非協力者」と「あまのじゃく」に打ち負かされる「お人好し」は成功しにくい。

それに対して本稿のシミュレーションモデルは戦略自身が変わるので、ある戦略が次世代には全くなくなってしまう場合も含んでいる。

TFT 戦略者との対戦によって「裏切りの」な他の戦略がほとんどなくなってしまい、「お人好し」同士や TFT との対戦が頻繁になるにつれて、集団はますます「お人好し」に集中するのである。

ただし、ここで「集中」とはいつでも、集団がそのままその戦略に収束することを意味してはいないことに再び注意しよう。突然変異による「非協力者」

や「あまのじゃく」の発生は「集中」を崩壊させる。

Fig. 6 は TFT 濃度が 70% の場合の集団平均適合度の推移である<sup>17)</sup>

平均適合度は Fig. 2 (TFT 濃度 0%) よりも全体的に高くなっているし、ほぼ完全な協力をしめした回数も多いが、依然として循環を繰り返している。

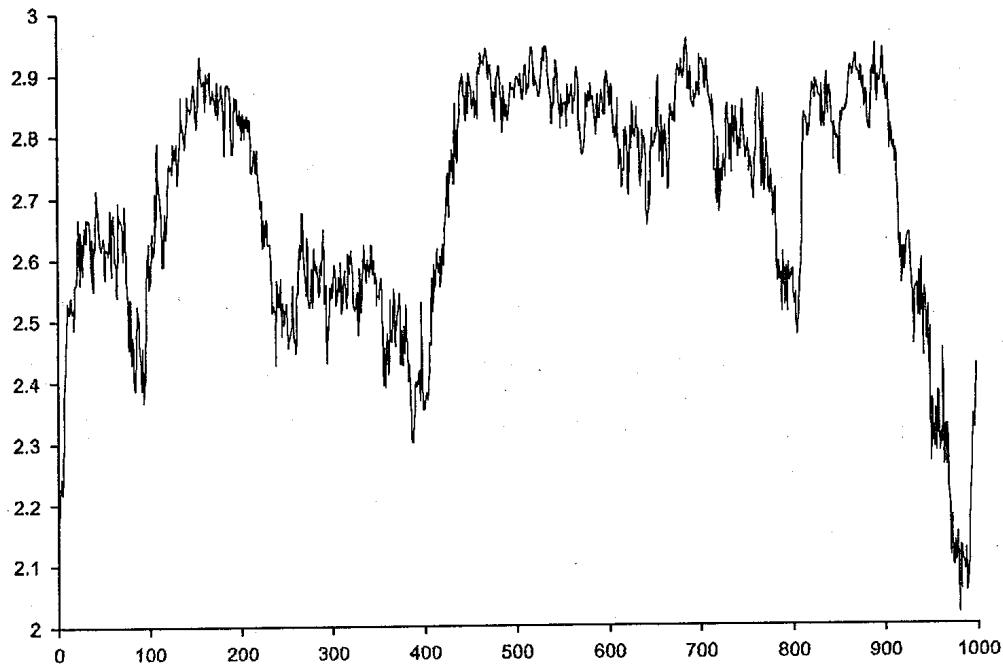


Fig. 6 : TFT 濃度 70% での平均適合度

#### 4 結 論

本稿では Nowak & Sigmund (1992) で提案された確率的な戦略に GA を組み込むことによって、Axelrod (1987) では困難だった戦略の進化を分析した。

これによって戦略空間を 2 次元まで落とし、かつ固定的な戦略設定という制約をはずすことによって、戦略の生成消滅を分析範囲に含めた。この結果、Nowak & Sigmund の分析以上に戦略自身の進化を検討することができた。

TFT 外部環境を設定しなければ、ランダムに生成された集団は、「相手の協

17) グラフの縦軸原点が 2.0 になっていることに注意。

力に対する態度」が「“裏切りの”か“礼儀正しい”か」の間で循環を繰り返す。

「相手の裏切りに対する態度」に対して「寛容」な戦略は進化せず、「報復」的な戦略のみが集団中に広まりやすい。ここでの設定は「動物的な集団」を想定しているが、「寛容」が進化しにくい、という結論は冷戦時代の東西対立や現在での地域紛争をイメージさせるものである。

TFT 外部環境を設定することは、このシミュレーションでも非常に大きな変化を集団にもたらした。戦略分類による「お人好し」は TFT 濃度が低ければ非常に小さな割合しか集団中に占めないが、TFT 濃度が高くなれば急速に大きな割合に成長する。

前著におけるシミュレーションでもそうであったが、集団の進化にとって、なんらかのリファレンスになる環境は非常に重要な意味を持っている。シミュレーションに用いた本質的に無能な集団でも外部に参照すべき戦略を与えればそれに適応していく。動物のように本能的な行動しかしないような集団でも繰り返し規範を示せばいずれそれに適応していく、ということである。

ここで与えられた TFT 環境によって、集団が TFT のような「互惠主義」的戦略を進化させるのではなく、より寛容な「お人好し」的な戦略を進化させるのはたいへん興味深い結果である。これは TFT が「お人好し」に対しては All-C 戦略者として振る舞うことに原因が求められる。GA は実質的に All-C 戦略を模倣したことになる。これによって「協力」が完全に持続されるわけではないが、集団の平均適合度はかなり高まる。

本稿でのシミュレーションモデルをより社会的集団に近づけるためには、過去の記憶を伸ばしてより確定的な行動を設定せねばならないが、それは非常に困難である。

過去の記憶回数を伸ばせば、対応する状況はもっと複雑になり、それによって戦略を低次元空間で表現することが著しく困難になるからだ。おそらくはここで取り扱った「過去1回の記憶」が最大であろう。過去2回に記憶を伸ばせば、可能な状況は4通りになるので戦略を記述するために4次元が必要になる



からである。

したがって、記憶を伸ばして今回のような戦略進化を分析する場合には「過去の記憶」が現在の行動に影響する方法を別のものにしなければならないであろう。

### References

- 安田俊一(2001), 'GAによる囚人のジレンマ実験—ダーウィンの手法とラマルクの手法—', 松山大学論集 13(2), 37-62.
- Axelrod, R. (1987), The evolution of strategies in the iterated prisoner's dilemma, in L. Dabiz, ed., 'Genetic Algorithms and Simulated Annealing', Pitman, pp. 32-41.
- Axelrod, R. (1997), The Complexity of Cooperation, Princeton University Press.
- Binmore, K. (1998), 'Review The Complexity of Cooperation', Journal of Artificial Societies and Social Simulation 1(1), <<http://jass.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html/1/1/review1.html>>.
- Boyd, R. & Lorberbaum, J. P. (1987), 'No pure strategy is evolutionarily stable in the repeated prisoner's dilemma game', Nature 327, 58-59.
- Farrell, J. & Ware, R. (1989), 'Evolutionary stability in the repeated prisoner's dilemma', Theoretical Population Biology 36, 161-166.
- Goldberg, D. E. (1989), Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley.
- Nowak, M. & Sigmund, K. (1989), 'Oscillations in the evolution of reciprocity', Journal of Theoretical Biology 137, 21-26.
- Nowak, M. & Sigmund, K. (1990), 'The evolution of stochastic strategies in the prisoner's dilemma', Acta Applicandae Mathematicae 20, 247-265.
- Nowak, M. & Sigmund, K. (1992), 'Tit for tat in heterogeneous populations', Nature 355, 250-253.