

記憶におけるノイズ

—GAによる囚人のジレンマ実験(3)—

安 田 俊 一

0 はじめに

筆者は「遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms: 以下 GA) による繰り返し囚人のジレンマ (Repeated Prisoner's Dilemma: 以下 RPD) 実験」で「ダーウィンの手法」と「ラマルクの手法」の比較を行った際に「記憶が遺伝する」というラマルク的な性質は協力を進化させやすいことを明らかにした¹⁾。人間社会や経済はラマルク的な進化を行っていると考えられるから「協力」の成立に対して「過去の記憶」は重要な役割を果たすことが予想される。

動物集団と違って、人間による RPD では過去のゲームに関する記憶は長く、かつ自分が出す手についてのエラーは少ないと考えてよい。したがって人間や企業などがプレイヤーとして想定される場合には Nowak & Sigmund (1992) が考察した「確率的戦略」ではなく、Axelrod (1987) が採用したような「決定的戦略」がふさわしい。各個体は完全な記憶に基づいて自分の行動を決定し、その決定は確実に実行される。この場合、行動を決定する際に用いられる過去のゲームに関する記憶は決定的に重要である。

しかし、動物に限らず人間社会においても「過去」のことは容易に忘れられる。特に、GA で想定しているように「世代交代」を考える場合は、記憶を正確に次世代に伝えることはしばしば難しい。社会が記憶を次世代に伝えるため

1) 安田俊一 (2001a)

には「記録」に頼るしかないが、記録はそれを記述する主体やそれを取り巻く社会状況、関係者の利害関係、イデオロギー等によって容易に「改竄」されるからである²⁾

記録の改竄とは次世代に伝えられる情報に「ノイズ」が混じることを意味している。本稿での関心は、Axelrod 流に、記憶が長く、それにしたがって決定される選択を間違いなく遂行するような主体からなる集団において、次世代へ遺伝する記憶情報にノイズが混じる場合に協力の進化はどのような影響を受けるかを分析することにある。

通常の RPD の文脈で「ノイズ」という場合には、相手の行動をうまく認識できなかつたり、自分で決定した行動を採り損なうという意味で使われる³⁾。この場合は相手の行動をエラーを伴って認識すること、決定の実行が確率的であること、を意味する。本稿での関心はそうではなく、あくまでプレイヤーの状況認識と決定遂行能力は完全であるにも関わらず、記憶に関してノイズが混じる、ということにある⁴⁾

本稿で取り上げるノイズは以下の2種類である。

- (1) 次世代へ記憶を伝える際にノイズが入る。
- (2) 現世代の行動決定に使われる記憶のうち、古いゲームに関する記憶にノイズが入る。

以上の2種類のノイズが存在することを仮定して、GA による RPD シミュレーションを行う。前者のノイズは「世代間」での記憶に関する問題であり、後者は「世代内」での記憶に関する問題である。

以下では基本となるシミュレーションモデルを概説し、記憶ノイズを定義す

2) 最近の「教科書問題」はそのことを端的に示している。第2次世界大戦後1世代を経るかどうかの短いスパンで、歴史上の重大事件がなかったことになったり意味が正反対になったりすることが全社会的に行われようとしているわけだから、もっと小さな組織にあっては記録の改竄は通常にありうることでありとみなさねばならないだろう。

3) Axelrod (1997) ch 2

4) 後述のように記憶に関するノイズの設定によっては「自分の行動や相手の行動を誤認する」ことと同じ意味をもつ場合もある。

る。最後にシミュレーション結果を述べる。

シミュレーション結果からは、ノイズの影響は非常に重大であることが明らかにされる。次世代へ引き継がれる記憶がノイズによって攪乱されると協力の進化は非常に困難になる。

1 シミュレーションモデル

1.1 基本モデル

本稿でのすべてのシミュレーションモデルはAxelrodのGAモデルを修正したものである。

安田俊一(前掲)で指摘したように、AxelrodはGAのコーディングにおいて表現型と遺伝子型を混同している。そこで本稿のモデルではこの混同を除去して、「記憶(表現型)」と「戦略(遺伝子型)」を明確に区別する。

シミュレーションプログラムにおいて、各個体は「記憶領域」として過去のゲームを記憶するための文字列配列と、「戦略領域」としてゲームで採られる選択肢(「C」と「D」)が並んだ文字列配列の2種類の配列を持っている。「染色体」として機能するのは戦略領域配列だけであり、記憶領域はGA過程には入らない。

行動の決定ルールはAxelrodモデルに従い、記憶領域を2進数と読んで、それが指し示す戦略領域の遺伝子座にある文字をゲームにおける行動とする。

この方式の場合「過去のゲームを何回まで覚えているか」にしたがって戦略領域配列の長さ(染色体の長さ)が決まる。以下のシミュレーションでは基本的に各個体は「過去5回の記憶」を持っているものとしよう。この場合、記憶領域の長さは $10(5 \times 2)$ 、染色体の長さは $2^{10} = 1024$ となる。

初期にランダムに生成された20個体からなる集団は、ランダム対戦によって平均150回のRPDを行う⁹⁾。その結果得られる平均利得の大きさを適合度として、各個体は「選択、交叉、突然変異」といったGA過程に入る⁹⁾。このとき染色

体として操作対象となるのは戦略領域だけである。

1.2 記憶の取り扱い

記憶領域は染色体ではないのでGA過程での操作対象にはならず、毎回のゲームで更新された記憶配列は交叉や突然変異を受けずに次世代に引き継がれる。集団の大きさは全世代で変化しないので、最初にランダムに生成された集団以降はすべての個体が前世代で親として選択された個体の記憶を引き継ぐことになる。

この点は安田俊一（前掲）で取り扱った「ダーウィンの手法」と異なっている。ダーウィンの手法においては記憶配列は各世代でランダムに生成され、前の世代が持つ記憶からは影響をいっさい受けない。したがって記憶配列が次世代に引き継がれるという本稿のモデルは「ラマルク的な手法」に基づくものである。もちろん、記憶領域が染色体を構成しないという点でAxelrodモデルとも異なる。

記憶領域の長さは、協力の進化に対して非常に大きな影響を与える。したがって、ノイズを取り扱う前に記憶の長さが集団に与える影響を以下で概観しておく。

1.3 記憶の長さ

プレイヤーが「過去のゲームを何回まで覚えているか」という回数を「記憶

5) 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。

6) この手続きは安田俊一（前掲）と同様である。交叉率 0.25, 突然変異率 0.01, 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, 2 個の親から 2 個の子が作られるものとする。Goldberg (1989) に基づく線形スケリングを採用した。また標準的な GA の解説は安田俊一(前掲)の References を参照されたい。

の長さ (L)」と呼ぶことにしよう。例えば Axelrod モデルでは $L = 3$, Nowak & Sigmund モデルでは $L = 1$ である。

L の大きさは、協力への収束と集団の平均適合度に影響を与えることがシミュレーションによって示される。

以下の表は $L = 3, 4, 5$ のそれぞれのケースで、500 世代 GA を 1,200 回繰り返した結果をまとめたものである。

収束回数と集団平均適合度

	$L = 3$	$L = 4$	$L = 5$
収束回数(1,200回中)	1,034(86.2%)	989(82.4%)	938(78.2%)
最小(平均)	1.068	1.522	1.837
標準偏差(平均)	0.494	0.297	0.225

ここで、「収束回数」は 1,200 回の実験中に集団が協力へ収束した⁷⁾シミュレーションの回数である。あきらかに L が大きくなると収束回数が減少する。つまり記憶が長ければ長いほど協力へ収束する場合は少なくなる。

一方、「最小(平均)」は 500 世代中の集団平均適合度の最小値を 1,200 回の実験で平均したものである。また「標準偏差(平均)」はやはり 500 世代の間の集団平均適合度の標準偏差を 1,200 回の実験で平均したものである。記憶が長いほど平均適合度の最小値は大きくなり、その結果、集団平均適合度標準偏差は小さくなる傾向がはっきりと出ている。つまり記憶が長くなれば、集団平均適合度のグラフは上方へ移動し、変動は小さくなる。

Fig. 1 は $L = 3$ と $L = 5$ の場合の典型的な平均適合度の推移である(縦軸が集団の平均適合度、横軸が世代数)。ここでは両方の場合で協力への進化がみられているが、 $L = 3$ の場合は長く続いた協力が崩壊した後(150 世代前後)、平

7) 協力を進化させたとする基準は、直近 10 世代のうち 5 世代で集団平均適合度が 2.9 を超えることである。そうなった時を「集団が協力へ収束した」とみなす。なお、以降単に「収束」と呼ぶ。

均適合度は急速に低下して、いったん集団は「裏切り」に収束している（平均適合度1）。その後平均適合度は急速に上昇するが今度は協力へ進化することなく、2—2.5の間で推移している。一方、 $L=5$ の場合は、全体的に高い適合度（2.2—2.3）で推移した後、210—240世代にかけて協力を進化させた。その協力が崩壊した後も、平均適合度はそれほど低下せず、2.2—2.5を推移し、450世代辺りで再び協力を短い期間進化させている。それが崩壊してからも平均適合度は $L=3$ の場合ほどドラスティックには低下しない。

記憶が長い場合に平均適合度のドラスティックな低下がみられないのはFig. 1に限ったことではない。全体1,200回の実験のうち、 $L=3$ ではほとんどの場合に「最低平均適合度 = 1」、すなわち集団の裏切りへの収束を記録したのに対して、 $L=5$ ではそれが1回しか観察されなかった。

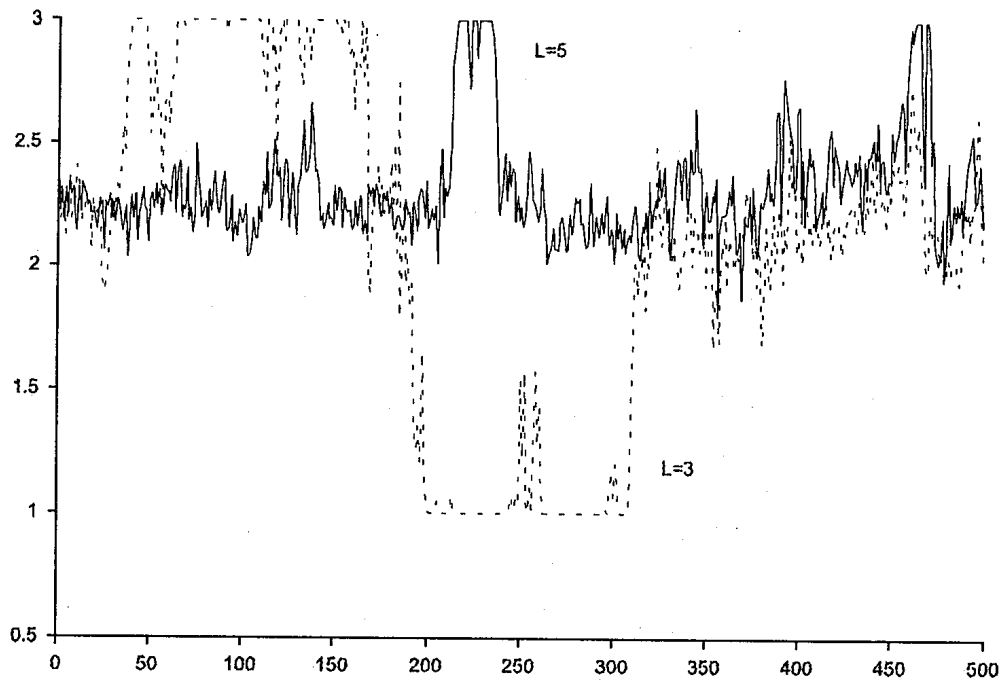


Fig. 1 : 平均適合度の推移 ($L=3, 5$)

さらに、記憶が長くなれば上述のように集団平均適合度の分散が小さくなるだけでなく、集団の散らばり程度も小さくなる傾向がある。

以下の表は各世代毎に集団の適合度の標準偏差を計測し、500世代でもっとも大きな値を取りだし、1,000回実験で平均したものと、すべての実験でもっと

各世代での適合度 (最大) 標準偏差

	$L = 3$	$L = 4$	$L = 5$
平均	1.312	1.237	1.090
最大	1.520	1.509	1.451

も大きな値をそれぞれの L で比較したものである。

集団内での個体の散らばりは記憶が長くなれば小さくなる傾向がはっきりと示されている。

以上から、記憶が長ければ集団は全体的に高い平均適合度を示し、しかも各個体の適合度は接近する。しかし同時に協力への進化も少なくなるし、裏切りへの進化はほとんど見られないことが明らかである。

この理由は、以下のようなものであると考えられる。

本稿でのシミュレーションモデルでは、記憶が長いということは、個体が多様な歴史に適応しうることを意味している。例えば $L = 3$ の場合には各個体は $2^6 = 64$ 通りの可能な歴史に適応する。これが $L = 5$ になると $2^{10} = 1024$ 通りの歴史への適応が可能になる。このことは多様な場合への適応が可能になるため各個体の状況への適応能力が高まることを意味している。つまり各個体は「うまくやる」方法を身につけるので集団の平均適合は上昇し、各個体の散らばりも少なくなる。したがって集団にとって最悪の結果である裏切りへの収束はほとんど見られない。

ところが、記憶が長いということは同時に「記憶領域が長い」ということを意味する。 $L = 3$ の場合には記憶領域の長さは $3 \times 2 = 6$ であるから、6ビットがすべて「C」であれば協力へ進化しうる。それに対して $L = 5$ の場合に協力へ進化するためには長さ $5 \times 2 = 10$ の記憶領域すべてが「C」とならなければならない。当然記憶領域のどこかに「D」が入り込む可能性は高くなる⁸⁾。そうなった場合には協力への進化は難しい。同様に、「完全な裏切り」は記憶領域全

8) 記憶領域は「突然変異」を受けないので、ここでの「可能性」は5回の歴史の中で「D」を出す、あるいは出したものと対戦する可能性が高いという意味である。

てが「D」でなければならないが、これも起こりにくくなる。

特に、記憶領域を遺伝させないダーウィンの手法では、 $L = 5$ のケースでは同じ 500 世代 GA, 1,000 回実験中で協力の進化はいっさい観察されなかった。これはラマルクの手法は RPD において協力を進化させやすいとした安田俊一（前掲）での結論を補強する結果である。

このように、記憶の長さはシミュレーションの結果に大きな影響をおよぼす。以下でノイズの影響を取り扱う際には、上述のように $L = 5$ で統一する。この場合の記憶領域の長さは 10、戦略領域の長さは 1024 である。

2 ノイズの種類

過去のゲームに関する記憶がノイズで攪乱されるという場合、本稿での文脈では 2 つの意味が考えられる。

一つは記憶が次世代に引き渡される際にノイズが入る場合である。この原因は本稿のはじめに述べたように記録の改竄、あるいは複写ミスによって引き起こされるであろう。これを本稿では「Type 1 ノイズ」と呼ぶことにしよう。

本稿のシミュレーションモデルにおいて、この Type 1 ノイズは記憶領域が次世代へコピーされる際に発生しうる。10 ビットの記憶領域が次世代を構成する個体へ引き渡される際に各ビットはある確率で反転 ($C \rightarrow D$ あるいは $D \rightarrow C$) する。この確率が Type 1 ノイズ確率である。記憶領域は 10 ビットであるから、もしこの確率が 0.1 を超えているならば次世代の記憶にはほぼ確実にどこかにノイズが入る結果になる。

ある世代がゲームを続けていく過程でも、各個体が持つ記憶にノイズは発生しうる。各個体は過去のゲームの記憶に基づいて現在の行動を決めているわけだが、その記憶にノイズが入るのである。古いゲームの記憶は忘れられうる。これを「Type 2 ノイズ」と呼ぼう。

Type 2 ノイズは、記憶領域 10 ビットのうち数ビットが、繰り返しゲームの

最中にランダムに変化することによってモデル化される。

例えば現在のゲームの結果が(C, D)というものであったとしよう⁹⁾この場合、この個体が次のゲームでの選択を決定する際に依拠する記憶領域は

*****CD

となる¹⁰⁾

この個体がさらにゲームをすすめると、この(C, D)という結果は次第に過去のものになっていくのでゲームの記憶にはノイズが入り、上のケースでゲームを5回続けた後には、例えば

DD*****

という記憶配列ができあがる。この場合は5回前の相手の行動(第1ビット)については結果的に正しい記憶を保持しているが自分の行動(第0ビット)については記憶が混乱し、実際には「C」であったのに「D」として記憶されている。

このような記憶の混乱が現在の状況や1回前の記憶などで引き起こされた場合には、相手の行動を誤認したり、自分の行動が予定されていたものと違っていたりするという通常 RPD におけるノイズの意味として使われていることと同じになる¹¹⁾

このように記憶領域のいくつかのビットがゲームの最中にランダムに変化する確率を Type 2 ノイズ確率とする。

Type 1 ノイズが次世代集団の初期状態に影響を与えるのに対して、Type 2 ノイズは現世代内での個体の行動に影響を与え、GA 過程を通じて次世代へ影響を与える。

以下のシミュレーションではそれぞれのノイズ確率を変化させて協力への進

9) (自分の手, 相手の手) の並び。

10) 「*」は「ワイルドカード」を意味し、「C」「D」のいずれかが入る。

11) ただし、自分の行動が確率的だ、とはいえない。あくまで本稿のモデルでは決定的な行動を取り扱っているからである。行動の基礎になる過去のゲームに関する記憶が混乱するだけである。

化がどう変化するかを観察する。

3 シミュレーション結果

3.1 Type 1 ノイズ

次世代へ記憶配列がコピーされる際に、各ビットは確率 p_0 で反転するものとする。 p_0 の大きさが協力の進化に与える影響は非常に重大である。

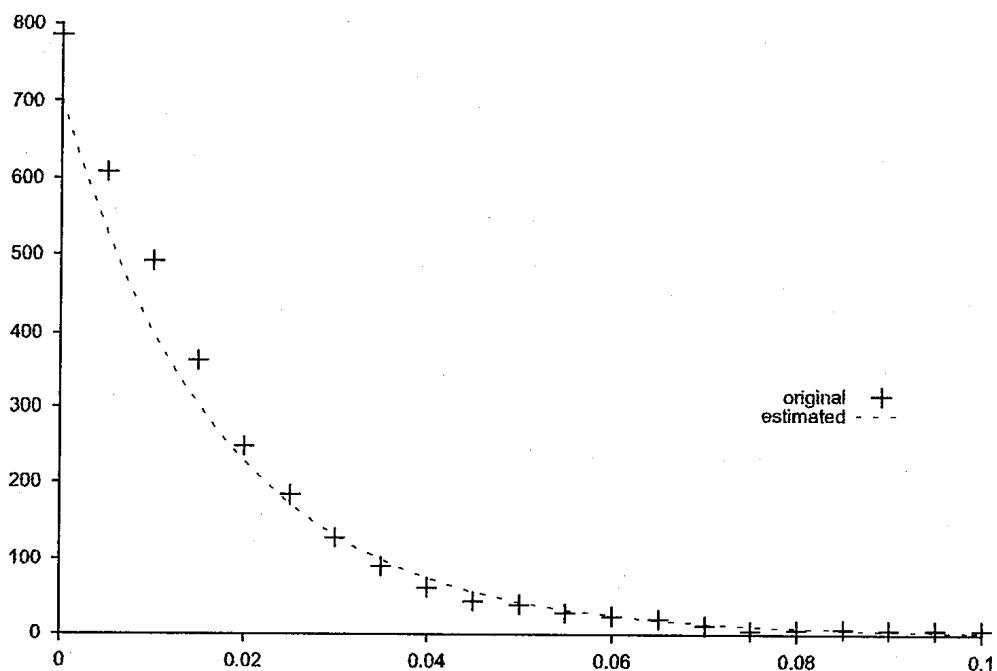


Fig. 2 : ノイズ確率 p_0 と収束回数

Fig. 2 は p_0 を 0 から 0.1 まで、0.005 刻みで変化させ、それぞれ 500 世代 GA を 1,000 回繰り返した実験のうち、協力を進化させた実験回数をプロットしたものである（縦軸が収束回数、横軸がノイズ確率の大きさ）。図中の「+」が観測された値を示す。例えば $p_0 = 0$ では 1,000 回中 786 回の実験で協力が進化した¹²⁾

p_0 の上昇とともに協力へ進化する回数は急激に低下する。 $p_0 = 0.1$ では 1,000

12) 以下ではこのケースを「ノイズがない場合」のリファレンスとする。

回中5回しか協力は進化しなかった。

このグラフから非常に興味深い事実が観察される。まず第一にノイズ確率 p_0 は非常に小さな確率であっても協力への進化を著しく阻害することである。 $p_0 = 0$ からわずかに1%変化させるだけで収束回数は786回から489回へと約60%になった。

次に特徴的なのは、収束回数の低下が p_0 の変化に対して非線形で起こっていることである。グラフから直感的に収束回数は $a \exp[-\beta p_0]$ にしたがうことが予想される。実際、収束回数を K とすると、 $K = 701.342e^{-56.198p_0}$ は実験データを非常にうまく説明している¹³⁾ Fig. 2 中の「estimated」の点線がこのグラフである。

ノイズ確率が10%を超えると集団はほとんど協力を進化させなくなる。この水準は長さ10の記憶配列においては記録のどこかが間違えて遺伝することを意味するから、誤認された歴史が次世代へ伝えられると、集団はほぼ確実に協力への進化をしなくなると考えて良い。

3.2 Type 2 ノイズ

Type 2 ノイズは繰り返しゲームを行っている最中に「昔のことを忘れてしまう」種類のノイズである。

n 回前のゲームを忘れてしまう確率を p_n として ($n = 1 \dots 5$), 以下の2種類を考える。

- 特定ノイズ確率: p_2, \dots, p_5 の特定箇所にはノイズ確率を与える。それ以外の箇所ではノイズは発生しない。
- 線形ノイズ確率: $p_1 = 0$ から $p_5 = \bar{p}$ までノイズ確率が線形に増加する。

何回前の記憶をどれくらいの割合で忘れてしまうかに応じて幾種類もの「忘

13) K の対数変換を行った上で OLS によって推定した。推定結果は

$$\log K = 6.553 - 56.198 p_0$$

自由度修正済決定係数は 0.968, 定数項および係数の t -値はそれぞれ 48.83, 24.478 であり, いずれも 0.5%水準で有意である。

れ方」が想定できるが、ここでは過去のゲームほど忘れやすく、最近のゲームほど忘れにくいという一般的な仮定をおいた。

いずれのケースにおいてもノイズが発生した場合、その回のゲームの記憶はランダムに書き換えられる。Type 1 ノイズが「間違っ」て記憶が書き換えられるのに対して Type 2 ノイズの場合は記憶が「あいまいに」なるのである¹⁴⁾

3.2.1 特定ノイズ

任意の箇所にもノイズを発生させることによって、協力の進化に当たって「何回前の記憶が重要か」を検討する。

シミュレーション結果によると、最近のゲームに関する記憶についてはノイズの影響は非常に重大であり、過去のゲームの記憶に関してはそれほど敏感には影響を受けないことが明らかとなった。

本稿で採用している Axelrod 流の戦略決定（記憶配列を2進数とみてそれによって戦略配列の選択肢から戦略を決定する）においては「5回前の記憶」が混乱した場合、収束回数は低下するが、他の箇所でノイズが入ったケースに比較するとそれほど大きな変化はない。

p_5 を 0.1 から 1.0 まで変化させた結果が Fig. 3 のグラフである。

これをみるとわかるように、 p_5 の上昇につれて 1,000 回実験中の収束回数は低下しているが、収束回数自体は依然として高い。このケースの場合は特にノイズが全然ないときよりも、 p_5 にノイズが入ったときの方が多くの収束回数を記録しており、 $p_5 = 1$ (5回前の記憶は完全にランダムになる) でも 751 回の収束を記録している。ノイズ確率と収束回数との決定係数は 0.372 であるので、両者に関係があったとしても非常におおまかな傾向でしかない¹⁵⁾

14) 確率 p_i で「当たり」があるくじを引き、「当たった」場合には記憶領域の該当箇所が、確率 $1/2$ で「C」か「D」となる。したがって偶然事実通りに書き換えられることもありうる。

15) 収束回数 (1,000 回中の合計) を K とする。OLS による推定結果は

$$K = 801.636 - 62.546 p_5$$

自由度修正済決定係数は 0.372, 定数項および係数の t -値はそれぞれ 56.986, 2.63。係数は 2.5%水準で有意である。

このことは、5回前のゲームの記憶に当たる記憶配列先頭2ビットは、協力を進化させる戦略決定に関しては、影響力は持っているがそれほど大きなものではないことを示している。グラフとOLSによる推定からは p_5 の上昇によって収束回数が低下する傾向があることは明白であるが、収束回数のこの水準自身は他の場所にノイズが入った場合に比較するとかなり大きい。言い換えるとAxerlod流のコーディングにおいて、戦略領域は、記憶領域の下位8ビットで示される256ビットまでが協力の進化に対して有効であり、それ以外はあまり重要な役割をはたさないことが考えられるのである。1.3節での結果をふまえて考えると、戦略領域のこの部分は協力を進化させる、というよりも、裏切りへの進化を止めるという役割を果たしているように思われる。

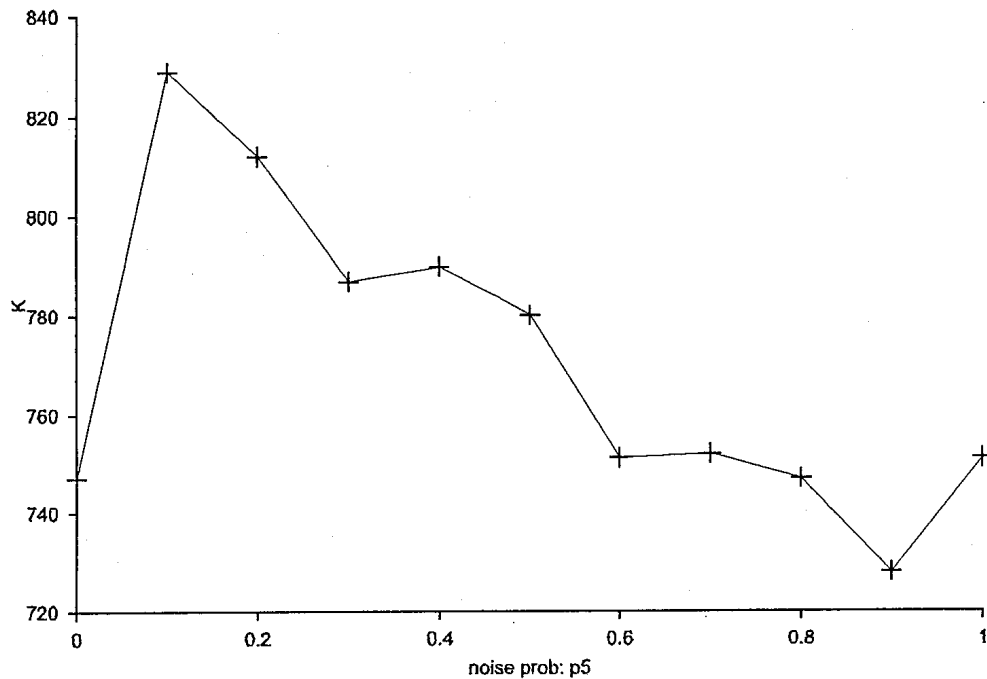
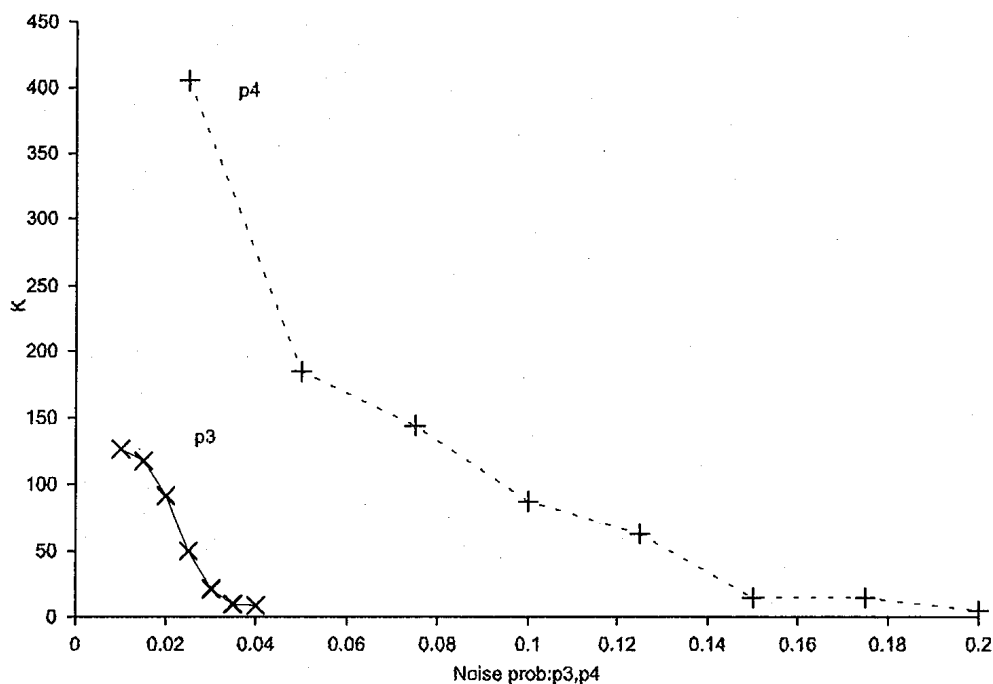


Fig. 3 : 特定ノイズ確率 p_5 と収束回数 K

これに対して p_3 , p_4 を変化させると、協力回数は急激に変化する。

Fig. 4 は p_3 については 0.01 から 0.04 まで 0.005 刻み、 p_4 については 0.025 から 0.2 まで 0.025 刻みで変化させ、それぞれについて 1,000 回中の収束回数をプロットしたものである。

Fig. 4 : 特定ノイズ確率 p_3 , p_4 と収束回数

すぐにわかるのは、 p_3 にノイズが入る場合には、非常に小さな値で収束回数が激減するのに対して、 p_4 では影響をおよぼすノイズ確率の値が一桁大きいことである。さらに、非常に小さくなるのでグラフには描いていないが、 p_2 については、0.005, 0.01, 0.015 のノイズ確率を与えた場合、収束回数はそれぞれ 22, 13, 5 となり、非常に小さな確率でも協力への収束がほとんどみられなくなる。

つまり、協力の進化は「遠い過去の記憶」に関する混乱に対するよりも「近い過去の記憶」に関する混乱に対して非常に敏感に反応する。1,000 回実験中の合計収束回数は $p_4 = 0.025$ で 405 回、 $p_3 = 0.01$ で 126 回、 $p_2 = 0.005$ で 22 回であるから、ノイズが全くない場合の 1,000 回実験中の収束回数 786 回に比較すると、その影響は明らかである。最近のゲームに関する記憶にノイズが入ると協力への収束は激減する。しかも影響を与えるノイズ確率は非常に小さなものである。

ノイズ確率に対する収束回数の弾力性はこのことを明白に示している。 p_3 ,

p_4 , p_5 の 1% 変化に対する収束回数の変化率は以下の通りである。¹⁶⁾

ノイズ箇所	p_3	p_4	p_5
弾力性	-2.125	-1.959	-0.053

あきらかに近い過去の記憶ほど弾力性が大きい。

また、グラフからも容易にみてとれるが、ここでもノイズ確率と収束回数の関係は非線形になっている。¹⁷⁾

3.2.2 線形ノイズ

前節のノイズ確率が、特定の箇所におけるノイズの影響を示したのに対して、線形ノイズはそれらが複合されたものである。

Type 2 ノイズが線形で引き起こされる場合、たとえ直前の記憶が完全 ($p_1 = 0$) であっても、ごくわずかのノイズで収束回数は激減する。

$p_1 = 0$ は固定しておいて、 p_5 を変化させた場合の 1,000 回あたり収束回数をまとめると次のような結果を得た。

Fig. 5 は横軸が p_5 、縦軸が 1,000 回中の収束回数である。 $p_5 = 0.005$ では収束回数は 79 回、以降 p_5 を 0.5% 刻みで増加させると、収束回数は 55, 41, 10, 6, 2 と低下し、 $p_5 \geq 3.5\%$ ではまったく収束が見られなくなった。

このグラフは $p_5 = 0.005$ から始まっているが、ノイズが全くないリファレンスケースでは収束回数が 786 回であったことを考えると、ノイズの影響は

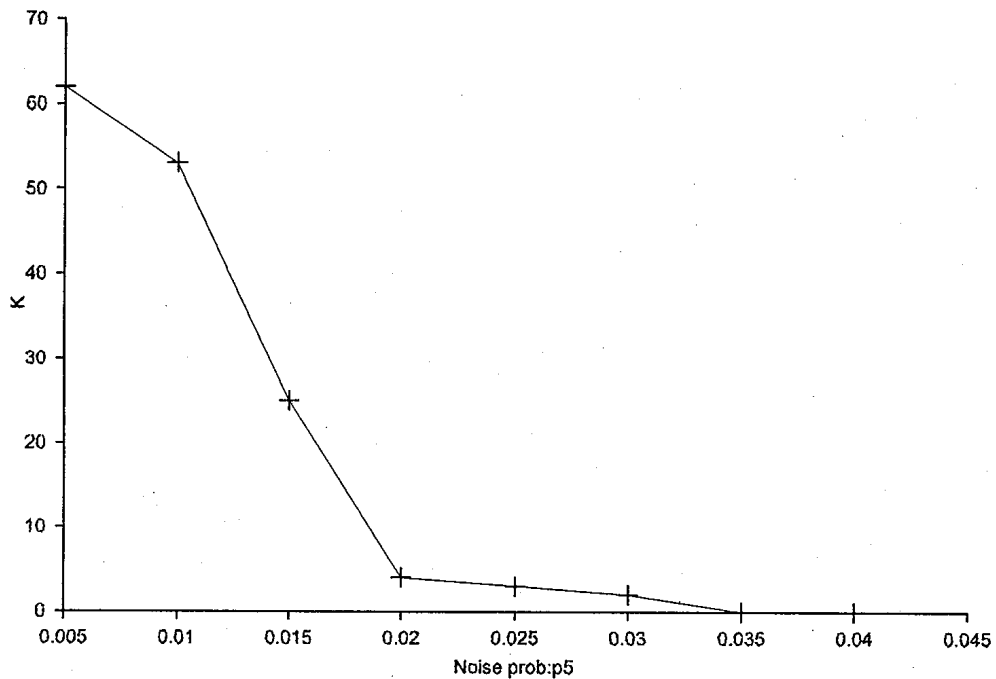
16) 対数変換のうえで OLS によって推定した。 p_3 , p_4 , p_5 それぞれの場合の推定結果の自由度修正済決定係数は 0.818, 0.819, 0.888, 係数の t-値は 5.287, 5.718, 8.506。いずれも 0.5% 水準で有意である。なお、この計測では $p_5 = 0$ の点を除いている。

17) 収束回数 (1,000 回中の合計) を K とすると、 K の対数変換を行った上で OLS による推定結果は p_3 の場合： $\log K = 6.206 - 102.162 p_3$

自由度修正済決定係数は 0.932, 定数項および係数の t-値はそれぞれ 20.543, 9.105。

p_4 の場合： $\log K = 6.680 - 24.015 p_4$

自由度修正済決定係数は 0.956, 定数項および係数の t-値はそれぞれ 27.251, 12.367 であり、 p_3 , p_4 どのケースでもすべての係数は 0.5% 水準で有意である。

Fig. 5 : 線形ノイズ確率 p_5 と収束回数

Type 1 ノイズよりも大きいことがわかる。わずかなノイズの発生は収束回数を約 1 割にまで低下させている。前節での結果から、収束回数のこの低下は主として $p_{2,3,4}$ におけるノイズの発生によることは明らかである。

4 結 論

繰り返し囚人のジレンマゲームにおいて、個体の行動が過去のゲームに関する記憶に基づくものである以上、その記憶の確実性は集団の協力への進化に対して大きな影響を持つだろうことは容易に予想される。特に Type 2 のようなノイズが起こった場合には、個体の行動自身が不確実な記憶に基づいたものになるので協力への進化は著しく阻害される。小さなノイズの混入によって協力への収束回数が激減したことはこのことを明白に示すものである。

Type 2 ノイズの場合で明らかになったのは、現世代での行動において決定的なのは「最近の」記憶である、ということである。5 回前のゲームに関する記憶がかなりあいまいであっても集団の協力への進化はほとんど影響を受けない

が、3回前や2回前のゲームに関する記憶の混乱は重大な効果を持つ。2回前のゲームの結果に関する記憶が0.5%で攪乱されることは、その回のゲームの記憶が200回に1回の割合であいまいになることを意味する。これは大きな確率ではないが、協力への収束回数は1,000回中で22回しか協力は進化しなかった。

最近のゲームに関する記憶が攪乱されると、その記憶が行動決定で使用されなくなるまで、誤った記憶は個体の行動を支配する。本稿でのケースでは、例えば2回前の記憶が攪乱された結果は、さらに3回のゲームに影響する。これが5回前の記憶が攪乱された場合と2回前の記憶が攪乱された場合との差をもたらしているものと考えられる。したがって、実験結果は、もし記憶の攪乱あるいは事実の誤認があった場合、早期に修正されなければその影響が重大であることを示している。

今回のシミュレーション結果で重要なのはType 1ノイズの影響力の大きさを明らかにしたことである。Type 1ノイズは次世代集団の初期値に影響を与えるだけなのにも関わらず、シミュレーション結果は、このノイズが致命的に協力の進化を阻害することを示している。集団が次世代へ伝える記憶配列のどこかが間違っただけで遺伝されると(ノイズ確率10%)集団は協力をほとんど進化させない。

ノイズがない場合には前世代で高い適合度を得た個体の最後の5回のゲームについての記憶がそのまま次の世代に引き継がれる。GAによる選択機構によって選択されるわけであるから、「親」となったそれらの個体は協力的な行動によって高い適合度を得た個体である。だからその記憶配列は「協力(C)」が並んだものになっているし、その染色体の第0ビット(記憶配列がすべてCであった場合に対応した箇所)に「C」がある。したがってそういった記憶と染色体を引き継いだ次世代ははじめから協力的な傾向を持ち、淘汰圧によってますますその傾向が強められる。これがノイズがない場合のラマルク的な進化のシナリオである。

記憶を次世代に引き渡す際にノイズが混じるとこの過程が破壊される。わずかに誤った記憶をもった世代は、それゆえに行動を誤り、結果として前世代での淘汰は意味がなくなる。ノイズが大きいとそれはダーウィンの進化と同じことになる。染色体が短い場合はダーウィンの進化の場合にも協力を進化させるのであるが、1.3節で示したように $L = 5$ の場合のように長い染色体ではダーウィンの進化は協力をほとんど進化させない。

安田俊一(2001a, 2001b)では、外部的に与えられた Tit-for-tat 戦略は、協力への進化をしない集団を協力へ向かわせる傾向があることを示した。ノイズによって記憶を攪乱された集団が同じようになんらかの外部的な規範の存在によって再び協力を進化させるのかどうかについては別の機会に譲りたい。

本稿のシミュレーションモデルの特徴は、記憶配列が染色体に含まれていないことである。このことは、個体の記憶が遺伝子のように生物機構内部にカプセル化されたものではなく、個体の外部から与えられることを意味している。これはモデルの対象となる集団が人間や企業集団である場合に対応している。動物社会は遺伝子による以外に情報を次の世代に引き渡すことはできないが、人間社会は記録によって記憶をあたかも遺伝子のように次世代へ引き渡すのである。しかしそれは遺伝子のように見えても個体内にカプセル化されていないため外部からアクセスが可能であり、その影響を容易に受ける。本稿のはじめに述べた通りである。

最後に本稿のモデルによる実験を「学習についての実験」に読み替えることも可能であることを指摘しておく。歴史的な時間における「次世代」を想定しなくとも、ある集団がゲームによって得た「経験」を他人に引き渡し、受け取った個体がその「教訓」をもとにゲームに参加する、と読み替えてもよい。この場合、Type 1 ノイズは教訓の引き渡しの際に間違った知識を引き渡すか、受け取った知識を誤認することに対応する。そのようなことが行われると社会における協力の進化は決定的に阻害されることをシミュレーションは示している。

現在わが国の一部で起こりつつある事態は次世代に誤った記録を引き継ぐ行

為であるか、現世代中に誤った教訓を引き渡す行為に他ならない。社会が単純な RPD を行っているわけでは決してないが（それでも冷戦中の米ソの軍拡競争は囚人のジレンマによってうまく説明できたことに注意しておくべきだ）、歴史の事実を改竄することは人間社会における協力の進化にとって非常に有害であることは明らかであるように思われる。

References

- 安田俊一 (2001a), '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.
- 安田俊一 (2001b), 'RPD における戦略の進化—GA による囚人のジレンマ実験(2)—', 松山大学論集 13(3), Forthcoming.
- 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.
- Goldberg, D. E. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley.
- Nowak, M. & Sigmund, K. (1992), 'Tit for tat in heterogeneous populations', *Nature* 355, 250-253.