

# 共進化プロセスのミクロレベルからの解明

Investigation of Co-evolution Process  
at Micro-Level

防衛大学校 村上 幸一 佐藤 浩 生天目 章

Yukikazu MURAKAMI, Hiroshi SATO and Akira NAMATAME,

National Defense Academy

E-mail: {g40046, hsato, nama}@nda.ac.jp

**Abstract** *It is an interesting question to answer how the society groups its way towards efficient equilibrium in an imperfect world when self-interested agents learn from others. In this paper, we focus on mutual learning. Each agent learns the rule of interaction in the negotiation situations. In this paper we consider mimicry as the methodology of individual learning. We show that all agents mutually learn to cooperate which result in social efficiency. We also investigate the meta-rules acquired by agents through mutual learning. With mimicry the meta-rules of all agents are categorized into a few meta-rules. We are made clear that the process of the co-evolution of the agent by explaining relations between meta-rules and the artificial society.*

**Key words** mutual learning, co-evolution, meta-rules, artificial society

## 1. はじめに

生物は自らの遺伝子を次世代に伝えるために、時に利己的に振舞うこともあれば、逆に利他的に振舞うこともある。しかしこのような行動は、生物が社会を意識することによって生じた結果ではなく、むしろ自身のために行動した結果が、客観的に見て、利己的な行動であったり、利他的な行動をであったりする場合が多い。そういう意味で、生物は利己的な主体であると言うことができる[1]。

しかし、このような利己的な主体である生物が、それぞれ利己的に振舞いながらも、社会全体では協調関係を成立させていることがあるのは、どうしてであろうか？どのようにして生物は、そのエゴイズムの誘惑の中で、協調関係を発達させていくのであろうか？

その疑問を解き明かす研究として、近年、人工社会や、マルチエージェントなどの手法を用いた、さまざまな研究が行われている[2][3][4]。しかし、これらの研究の多くは、生物がもつ、他の個体との相互作用の方法（以後、戦略）を、いくつかの特徴的なパターン（例えば、“必ず協調する”“必ず裏切る”“しっぺ返し”）などを、エージェント（ここでは、計算機上で自律的に振舞うことのできる主体）にあらかじめ与えた上で、対戦させ、その社会進化の傾向や協調関係が発生する条件を明らかにした研究が多い。

本論文では、これらの研究をふまえた上で、共進化という概念に、重点を置いた。

生物の進化を考えるとき、温度や水質、季節の変化といった生物以外の自然要因に対して進化させた適応的な形質とは別に、同種、他種の生物に対して進化させた適応的な形質があり、これを共進化という概念で

区別することができる[5]。そして、このような、生物的環境、つまり同種・異種の生物による選択圧の元では、進化は決して一方だけに起こるわけではなく、例えば、鳥・虫・花などのように、互いに関係のある生物の進化は、お互いがお互いの能力に磨きをかけるといった、いわゆる「軍拡戦争」的な一面を持っている。しかしそれは、常にお互いを敵と味方の関係に置くわけではなく、そのような中でも、生活や、相互作用を共に行なうことによって、双方が利益を得るといったような、共存・共生の関係を成立させている場合も多い。本論文では、このような生物の共進化の中でも、特に、互いに共生関係のような協調関係を成立させているような場合において、個々はどのような行動ルールを獲得しているのかを、ミクロレベルから見ていくことにする。また、エージェントに対しては、特徴的な戦略をあらかじめ与えることを避け、それぞれのエージェントが、ランダムな戦略を持つものとした。これによって、エージェントのもつ戦略に多様性を与える。具体的には、エージェントに対して、相互作用および、共同学習を行なわせ、その結果 社会全体の最適解を実現できるような協調的な社会形成に至った場合においては、多様な戦略の中でも、どのような戦略が生き残るのか、また、生き残った戦略の間には、どのような共通性（メタ・ルール）が見られるのかを、ここでは調べた。

このような、共同学習により獲得されるメタ・ルールの解析により、エージェント間での協調関係成立のために必要な条件、および その共進化のプロセスを明らかにしていく。

## 2. エージェントの相互作用関係

任意の2人のエージェントの間には、さまざまな相互作用関係が存在する[5]。本論文では、その中でも代表的な「協調ゲーム」「相補ゲーム」「ジレンマゲーム」及び「タカ・ハトゲーム」の4つのゲームを扱う。以下に本シミュレーションで用いた利得表及びパラメータを示した。

### (1) 協調ゲーム

協調ゲームとは、お互いの戦略を一致させることで、双方ともに利得を得ることのできるという場合であり、シミュレーションで用いた利得表は、表1の通りである。

ここでの均衡解は、 $(S_1, S_1)$ と、 $(S_2, S_2)$ の2つであり、それぞれがパレート優越、リスク優越となっているが、互いに暗黙のうちに協調戦略を選択することが条件であるために、ここでは、リスク優越である $(S_2, S_2)$ を選ぶこととなり、利得は0になる。

表1 協調ゲームの利得表

The other's Own's strategy strategy	$S_1$	$S_2$
$S_1$	1	1
$S_2$	0	-9

### (2) ジレンマゲーム

ジレンマゲームとは、エージェント同士が、互いに自分にとっての最高の戦略を選んだ結果、かえって、お互いが自分にとって不利な選択をしたときよりも、利得が低くなってしまうという場合である（表2）。ここでのパレート最適解は $(S_1, S_1)$ であるが、支配戦略 $(S_2, S_2)$ が存在するために、互いに獲得する利得は、1になってしまう。

表2 ジレンマゲームの利得表

The other's Own's strategy strategy	$S_1$	$S_2$
$S_1$	3	3
$S_2$	5	0

### (3) タカ・ハトゲーム

タカ・ハトゲームは、進化的ゲーム（後述）などでモデル化されるゲームの1つであり、表3のような利得表で定式化される。

ここでの戦略とは、各個体の行動様式であり、遺伝子に組み込まれた特有のものであるため、各個体が選択できる選択肢ではない。そして、獲得される利得は、本来、適応度を意味し、次世代に残せる子供の数を指

すが、本論文ではエージェントの構造と学習方法の違いから、利得として取り扱った。また、このゲームでは利得 $V$ とコスト $C$ を変化させることによって、戦略 $S_1$ と $S_2$ の優位性が変わってくるため、パラメーターの違う以下の3つケースについて考えることにした。

Case1:  $(V, C) = (2, 10)$ : 戰略 $S_1$ が有利な場合

Case2:  $(V, C) = (2, 4)$ : 戰略 $S_1$ と戦略 $S_2$ が5分5分の場合

Case3:  $(V, C) = (10, 12)$ : 戰略 $S_2$ が有利な場合

ここでの利得は、進化的安定戦略（Evolutionary Stable Strategy 以下 ESS）で求まり、各ケースでのESSは、全体に占める $S_1$ と $S_2$ の割合が、

Case1:  $S_1: 0.8 \quad S_2: 0.2$

Case2:  $S_1: 0.5 \quad S_2: 0.5$

Case3:  $S_1: 0.85 \quad S_2: 0.15$

の時である。

表3 タカ・ハトゲームの利得表 ( $0 < V < C$ )

The other's Own's strategy strategy	$S_1$ (Hawk)	$S_2$ (Dove)
$S_1$ (Hawk)	$(V-C)/2$	0
$S_2$ (Dove)	0	$V/2$

### (4) 相補ゲーム

相補ゲームとは、協調ゲームとは逆に、相手と異なった戦略を選択した場合に、双方利得を獲得できるという戦略である。相手と正反対の戦略をとらなければならぬような状況においても、各エージェントは適切な戦略の組み合わせを学習し、協調状態を築くことができるのだろうか。

ここで均衡解は、 $(S_1, S_2)$ 及び $(S_2, S_1)$ である。

表4 相補ゲームの利得表

The other's Own's strategy strategy	$S_1$	$S_2$
$S_1$	0	1
$S_2$	1	0

## 3. 学習と進化モデル

生物の進化に関する手法や、共同学習の方法として、進化的ゲームや、レプリケ-タ・ダイナミクスなどの代表的な手法があるが、ここでは、模倣学習を用いることによって、ESSを超える均衡解を得ることを目的とした。

### (1) 進化的ゲーム

進化的ゲームとは、タカ・ハトゲームのように、ある動物の大きな集団において、様々な2つの個体がラ

ンダムに遭遇してそれぞれの行動様式に依存してある数の子供を残し、次世代においては、子供たちが同じようにしてその子供を残していくというプロセスが世代ごとに繰り返されていく状況であり、その際に得られる均衡解は、ESS となる。<sup>[7]</sup>

ESS とは、集団を構成しているすべての個体が、その戦略を採用しているときに、突然変異によって生じる他のどのような戦略も、その集団の中に進化的に侵入できないとする戦略のことであり、タカ・ハトゲームでは、混合戦略によるナッシュ均衡解と同じである。しかし、ESS は最適解ではない。

### (2) レプリケータ・ダイナミクス (RD)

RD は、個々のエージェントの相互作用が、進化ゲームと呼ばれるゲーム論的な枠組みで与えられているときに、そのマクロ特性を時間発展作用素として導くことのできる手法である。

エージェントは、二つの代替案、例えばタカ・ハトゲームの場合は { H, D } という代替案の中から、意思決定を行い、その選択比率に応じた形で適応度が決まり、増殖する。<sup>[8]</sup>

RD も、ESS と同じく、混合戦略によるナッシュ戦略に収束することが知られている。

### (3) 模倣学習

模倣学習とは、自分の周囲において最も成功した者の戦略をうまく真似るというやりかたである。本シミュレーションでも同様に、エージェントは、周辺でもっとも成功しているエージェントの戦略決定表を、そのままコピーする(図 1)。模倣学習のような、相手との関わり合いの中から、何かを学びとり、自らの行動様式を改良していく方法は、広義の意味での進化とも言える。そしてそれは、生物が進化していくための極めて有効な手段の 1 つであると言えるだろう。

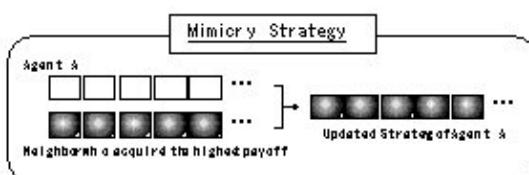


図 1 模倣学習

## 4. エージェント社会の構成

本論文で行うコンピュータシミュレーションには、エージェント、環境、ルールという 3 つの基本的な構成要素が絡んでいる。まずこれらについて説明する。

### 4.1 エージェント

エージェントとは、計算機上で自律的に振舞う主体を指すが、エージェントは、内部状態と行動ルール(後述)を持っている。エージェントの内部状態には、そのエージェントの一生を通じて一定な、先天的といえるものもあれば、外部環境や他のエージェントとの相互

作用を通じて変化する、後天的といえるものもある。このシミュレーションで先天的な状態としては、エージェントの名前(かつ、人工社会での存在位置)などがそれにあたるだろう。そして、後天的な状態として、エージェントは、これまでの対戦履歴、獲得した資産、戦略を決定する知識(戦略決定表)などが挙げられる。

また、エージェントの内部構造は図 2 の通りである。

各エージェントの内部構造を、7 ビットからなる配列( $P_i, i \in [1, \dots, 7]$ )で表現し、各配列の構成は次のように定める。

- ・第 1 ビット  $P_1$  は、各世代における 1 回目に出す戦略
- ・第 2 ビット及び第 3 ビット( $P_2, P_3$ )は、過去 1 回分の、自分と相手の対戦履歴
- ・第 4 ビットから第 7 ビット( $P_i, i \in [4, \dots, 7]$ )は、戦略決定表をあらわし、2 回目以降の対戦に参照される。この 4 ビットの初期値に乱数を入れることによって、各エージェントに、ランダムな戦略決定表を与えていく。

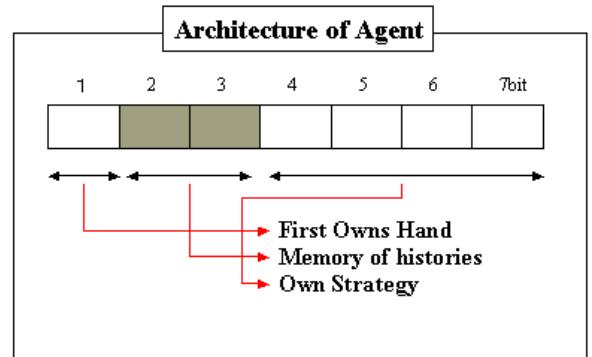


図 2 エージェントの内部構造

図 3 に、次の戦略を決めるための戦略決定表(strategy at t)と、過去の対戦履歴(past strategy)との関係についての一例として、TFT 戦略を採用した場合について示した。

bit	past strategy		strategy at t
	Own	Opp	
4	0	0	0
5	0	1	1
6	1	0	0
7	1	1	1

図 3 戦略決定表

### 4.2 環境

ここで環境とは、エージェントが相互作用する空間を示す。それゆえ、エージェントは環境の中に存在しているが、環境はエージェントとは別個の媒体を指す。本モデルでは、場を格子状に構成してモデル化している。

具体的には  $20 \times 20$  の二次元平面に、最大 400 人のエージェントを配した社会を考え、さらに、その左右の端と上下の端をつなげ、どのエージェントも等しく相

互作用できるようにした。(図4)

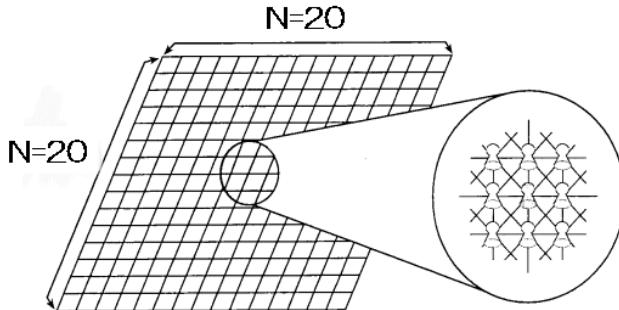


図4 エージェント社会の構造

#### 4.3 行動ルール

エージェントにはいくつかの行動ルール(以下、ルール)がある。

ここでは、自分の周りにいるエージェントと相互作用をするための“対戦ルール”および、周辺のエージェントから学び、より高い利得を得るために“学習ルール”をもつものとし、対戦と学習のサイクルをもって1世代とした。以下に、各ルールの詳細を示す。

##### 対戦ルール：

- ・自分の一つ前に他のエージェントがいるなら、1対1で対戦を行なう。
- ・対戦でとる戦略は、自分の過去1回の対戦履歴を参照して戦略決定表より、これを選ぶ。
- ・これを繰り返し、1世代に一人と50回の対戦を行なう。
- ・同様に、この1対1の対戦を周囲の8近傍のエージェントと行なう。

##### 学習ルール：

- ・その世代に対戦を行なった相手エージェントの中で、最も多い資産をもつエージェントを最良のエージェントとして認識。
- ・そのエージェントの戦略決定表を参考に学習を行なう。
- ・学習法は完全模倣を用いる。

### 5. シミュレーション結果

各ゲームは、それぞれ5回ずつシミュレーションを行うこととし、これら全体を通して現れる形質の把握に努めた。また、協調率及び、平均利得のグラフについては、各ゲームとも5回を通じて類似したものとなつたため、ここでは、特に1回目のグラフを用いるものとする。

そして、平均利得のグラフについては、上から、

- ・ 全体のエージェントの中で、最も利得を獲得したエージェントの値(最大利得)
- ・ すべてのエージェントの平均利得
- ・ 全体のエージェントの中で、最も利得の少なかったものの値(最小利得)

を、それぞれ表す。

#### 5.1 協調ゲーム

協調ゲームでは、10世代までに、すべてのエージェントが協調するようになり、パレート最適解を獲得するようになった(図5)。

そして、獲得されたルールは、表8に示すように、最終的に1~3種類に集約されると同時に、5回を通じ必ず獲得されるルール(Type1: 0111)も見られた。しかし、それよりも重要な点として、メタ・ルールの獲得が挙げられるだろう。協調ゲームを行なったエージェントは、必ず“01#1”(#は任意)というルールを獲得している。これを、状態遷移図に表すと図6のようになり、特に，“00”と“11”的部分に再帰点が見られた。

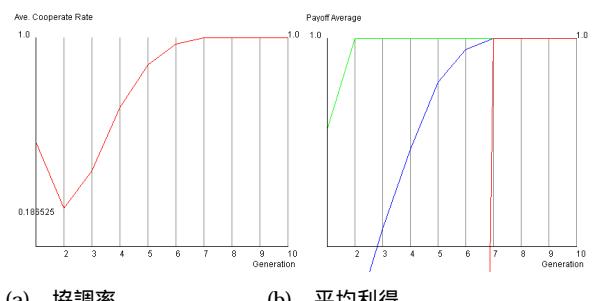


図5 協調率および平均利得(協調ゲーム)

表5 協調ゲームにより獲得された戦略

bit	Own	Opp	Type	試行1		試行2		試行3		試行4		試行5	
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
4	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	0		1	0	1	0	1	1	1	1	0	1
7	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Agent Number				396	4	381	19	400	391	9	312	79	9

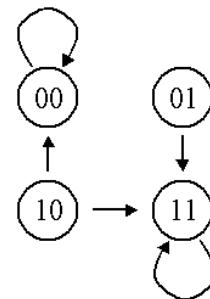


図6 メタ・ルール(01#1)の状態遷移図

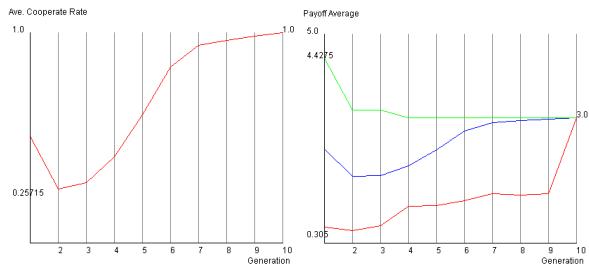
#### 5.2 ジレンマゲーム

ジレンマゲームでも協調ゲームと同様に、10世代までに、すべてのエージェントが協調する結果となり、パレート最適解を獲得するに至った(図7)。また、獲得されたルールは1~2種類に集約され、協調ゲームと同様“0111”という戦略が繰り返し現れた。協調

ゲーム、ジレンマゲームと、続けて現れたこの“0111”という戦略は、本来“11”に収束しやすい性質を持っているにもかかわらず、“00”的状態に協調している社会に多く存在し、ジレンマゲームに至っては、ほとんどのエージェントがこの戦略を採用しているのは興味深い。これについては、考察にて詳しく述べる。

そして、集約された戦略間には共通のルール（メタ・ルール）が見られたが、（表6）これも協調ゲームと同様“01#1”というルールを獲得する結果となった。

（状態遷移図については、図6）



(a) 協調率 (b) 平均利得

図7 協調率および平均利得（ジレンマゲーム）

表6 ジレンマゲームにより獲得された戦略

bit	Own	Opp	Type	試行1		試行2		試行3		試行4		試行5	
				7	7	7	7	7	7	7	2		
4	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0		
5	0	1		1	1	1	1	1	1	1	1		
6	1	0		1	1	1	1	1	1	1	0		
7	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1		
Agent Number				400	400	400	400	396	4				

### 5.3 タカ・ハトゲーム

#### (1) ケース1 : $(V, C) = (2, 10)$

このケースでは、利得  $V$  が小さく、コスト  $C$  が大きいため、争うことが不利になる場合を表している。

協調率及び、平均利得は図8の通りで、約20世代までに、エージェントは協調し、パレート最適である1の利得を獲得するに至っている。（今までのゲームと異なり、タカ・ハトゲームの場合は、戦略  $S_1$  が、協調戦略であるため、 $S_1$  の協調率を表す(a)のグラフが0となることが、協調状態を表す。）

また、獲得された戦略は概ね3種類程度（表7）であり、繰り返し現れる戦略“0001”も見られた。（タカ・ハトゲームでは、協調状態の戦略が逆の  $S_2$  であるため、これは、協調ゲーム・ジレンマゲームの際に現れた“0111”と同じ意味合いを持つ戦略と考えることができる。）

そして、獲得されたメタ・ルールは、“# # 01”であり、状態遷移図に表すと、図9のようになる。

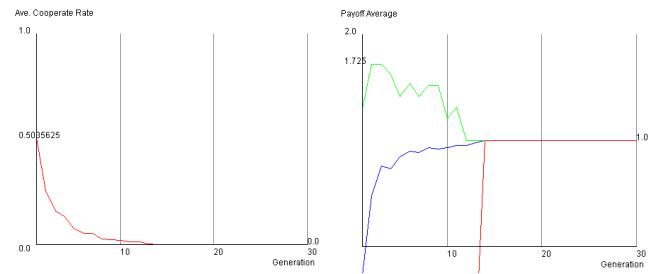
#### (2) ケース2 : $(V, C) = (2, 4)$

これは、戦略  $S_1$  と戦略  $S_2$  が5分5分の場合を表す。

協調率及び、平均利得は図10の通りで、約20世代までに、ケース1同様、協調し、パレート最適である1の利得を獲得している。

また、獲得された戦略については2～5種類程度に集約され（表8）、そして、繰り返し現れる戦略として“0001”“1001”が見られた。

獲得されたメタ・ルールについては、“# # # 1”であり、状態遷移図に表すと、図11のようになる。



(a) 協調率

(b) 平均利得

図8 協調率および平均利得 ( $V, C$ ) = (2, 10)

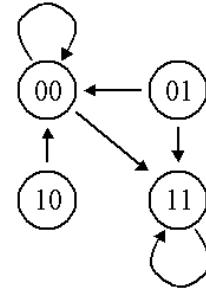
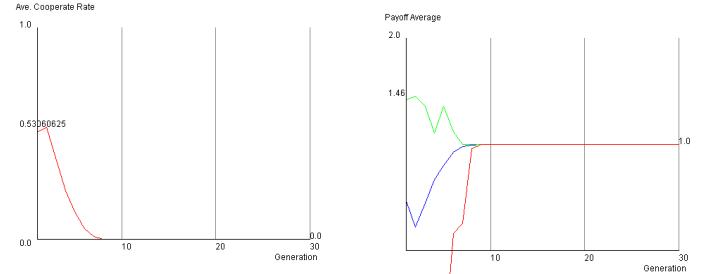


図9 メタ・ルール（# # 01）の状態遷移図



(a) 協調率

(b) 平均利得

図10 協調率および平均利得  
(タカ・ハトゲーム ( $V, C$ ) = (2, 4))

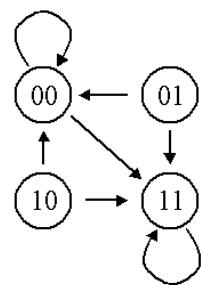


図11 メタ・ルール（# # # 1）の状態遷移図

表7 タカ・ハトゲームにより獲得された戦略 :  $(V, C) = (2, 10)$

bit	Own	Opp	Type	試行1				試行2				試行3				試行4				試行5			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
4	0	0	Type	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1
5	0	1		0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1
6	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Agent Number				224	76	36	64	6	327	50	17	107	214	79	199	201	104	82	131	83			

表8 タカ・ハトゲームにより獲得された戦略 :  $(V, C) = (2, 4)$

bit	Own	Opp	Type	試行1				試行2				試行3				試行4				試行5			
				1	2	3	4	5	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
4	0	0	Type	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
5	0	1		1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
6	1	0		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Agent Number				57	39	179	120	5	147	253	258	84	58	261	108	19	12	88	141	167	4		

表9 タカ・ハトゲームにより獲得された戦略 :  $(V, C) = (10, 12)$

bit	Own	Opp	Type	試行1				試行2				試行3				試行4				試行5			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
4	0	0	Type	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1
5	0	1		0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
6	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Agent Number				400	292	60	48	253	95	52	281	52	55	12	331	46	23						

### (1) ケース3 : $(V, C) = (10, 12)$

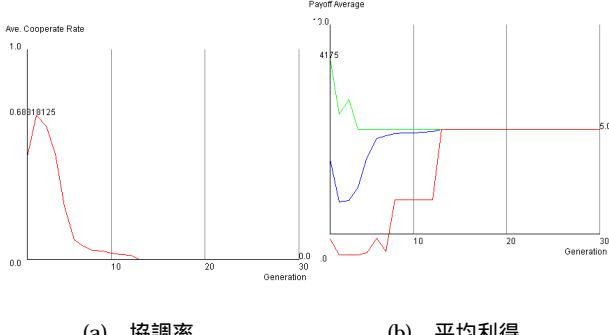
これは、利得  $V$  が大きく、逆にコスト  $C$  が小さいため、争うことが不利になるケースを表す。

協調率及び、平均利得は図12の通りで、約20世代

までに、エージェントは協調し、パレート最適である5の利得を獲得するに至った。

また、獲得された戦略は1~4種類(表9)であり、ケース1, 2と同様にここでも、繰り返し現れる戦略“0 0 0 1”が見られた。

そして、獲得されたメタ・ルールは、“# # 0 1”であり、ケース1同様、状態遷移図は、図9のようになる。



(a) 協調率

(b) 平均利得

図12 協調率および平均利得 ( $V, C$ ) = (10, 12)

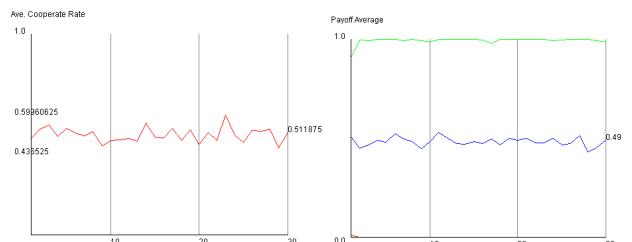
### 5.4 相補ゲーム

相補ゲームでは、戦略  $S_1$  と  $S_2$  を交互に繰り返し、平均利得 1 を獲得することがパレート最適であった。しかし、実際はそうはならず利得 0.5 付近という低い値にとどまってしまった。(図13)そこで、1手目に取る戦略については、模倣学習を行わず、世代ごとに、ラン

ダムに決めるようにしたところ、0.7付近と高い利得を獲得するようになった。(図14)

また、それぞれの場合に獲得した戦略は、表10, 11のとおりである。

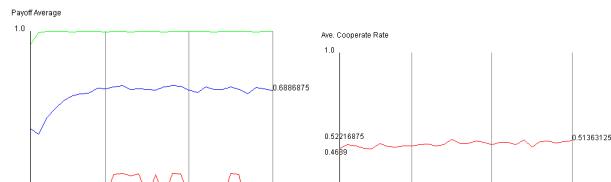
これからもわかるように、今までのゲームで用いてきた“1手目の戦略についても、成功しているエージェントの戦略を模倣させる”という方法によって獲得された戦略の間には、ここでは、メタ・ルールは確認できない(表10)。しかし、“1手目の戦略については、ランダムで決定する”という方法で相互作用を行った



(a) 協調率

(b) 平均利得

図13 協調率および平均利得 (1手目の戦略も模倣)



(a) 協調率

(b) 平均利得

図14 協調率および平均利得 (1手目の戦略はランダム)

表 10 相補ゲームにより獲得された戦略（1手目の戦略を模倣）

bit	Own	Opp	Type	試行1					試行2					試行3					試行4					試行5				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
4	0	0		1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	
5	0	1		0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
6	1	0		1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1
7	1	1		1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1
Agent Number				239	80	24	40	17	36	60	167	137	47	176	169	8	48	131	64	71	44	42	13	175	19	174	19	

表 11 相補ゲームにより獲得された戦略（1手目の戦略はランダム）

bit	Own	Opp	Type	試行1		試行2		試行3		試行4		試行5	
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
4	0	0		0	1	1	0	1	0	1	0	0	1
5	0	1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1		0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
Agent Number				176	224	264	136	202	198	248	152	166	234

エージェント達の獲得した戦略の中には、明らかにメタ・ルールが存在していることがわかる（表 11）。同時に、必ず 2 種類の戦略が生き残ることも、興味深い。

図 15 は、この 2 つの戦略の分布状態を表したものである。ここでも、それぞれの戦略は、住み分けることなく、まだら模様の分布を作っていることからも、互いの戦略が譲りあいを学習している可能性を示唆している。（Type1 が黒 Type 2 が灰色）

また、ここで、獲得されたメタ・ルールを、状態遷移図に表すと図 16 のようになる。ここでは，“00” “11”的状態を互いに行き来するような状態推移が生じており、この矢印が、エージェントの利得を高める 1 つの要因となっている。

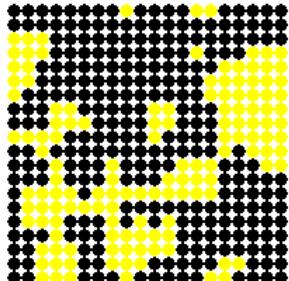


図 15 戰略の分布

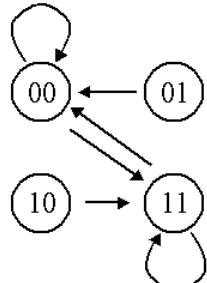


図 16 メタ・ルール (# 0 1 # ) の状態遷移図

## 6. 考 察

以上のような結果から、まず、エージェントは模倣学習により、パレート最適解を実現できるような、協

調的な社会をつくり出すことができる事がわかった。

各ゲームにおいては、それぞれ特徴的なメタ・ルールを学習していることわかり、そして、そこから協調のための条件と、共進化のプロセスが明らかになってくる。

まず、協調のための条件として、以下の 2 点が挙げられるだろう。

はじめに、この協調状態は、初期配置に大きく依存しているということである。各相互作用で獲得されたメタ・ルールの状態遷移図を見ると明らかなように、各エージェントは、パレート最適解上に再帰点をもつようなメタ・ルールを獲得してはいるが、しかし、すべての状態から必ずパレート最適の状態へ遷移できるようなメタ・ルールを獲得しているわけではない。メタ・ルールとしての視点ではなく、獲得されたルール単体として見ていくならば、協調ゲームやジレンマゲームにおいて大勢を占めた“0111”やタカ・ハトゲームでの“0001”などのルールのように、むしろ、パレート最適以外の状態から相互作用が始まつた場合にはパレート最適へと遷移できないような場合の方がが多い。よって、エージェントが協調するためには、第 1 手目で互いに協調の手を選ぶことが重要である。そうすれば、じ後は互いに協調し続けることができ、高い利得を獲得できるからである。しかし、ジレンマゲームなどで大勢を占めたこの“0111”という戦略は、協調することもできるが、それとは逆に一度裏切ったならば、じ後は裏切りの状態が続くという相反する一面も持ち合わせている。

そのような状態の中で、エージェントが協調状態を成立させていくことができたのは、次のようなプロセスによると考えられる。

エージェントのとる第 1 手目は、第 1 世代では、ランダムに決定されているが、第 2 世代以降は、模倣学習によって、成功したエージェントから、コピーされる。このため、1 手目で協調を選ぶようなエージェントの小集団（ニッチ）ができたならば、それらは、必ず協調することができるため、長期的な相互作用の中で高い利得を獲得することができ、やがて、その戦略は

社会全体へと広がって、協調的な社会を形成することができると言えられる。このような点からも、経路依存が生じるケースでは、初期配置は非常に重要であると言えよう。

しかし、相補ゲームのように、互いに異なった戦略を選択することによって、利得を獲得するケースでは、初期配置を固定してしまうことは、逆にマイナスの要素として働いてしまうこともわかった。むしろ、初期値のランダム化や、ノイズのような、他のゲームでは、協調を阻害してしまうような要因が、プラスの要素として働き、メタ・ルールを獲得することができる。

協調のための条件の2番目としては、吸収点の存在が挙げられる。エージェントは、各ゲームにおいて、そのゲームでのパレート最適解を選ぶようなメタ・ルールを獲得しているが、その点が吸収点となって、社会を協調状態へと導いたと考えられる。つまり、共進化のためには、パレート最適解での吸収点の存在が必要不可欠であり、また、そのような、吸収点を形成でき得るような、メタ・ルールの獲得がここでは重要なになってくる。

次に、共進化のプロセスであるが、これは、先ほども述べたような、パレート最適解上に再帰点をもつ戦略によるニッチの形成によるところが大きい。このような戦略を持つエージェントが隣合わせると、相互に協調することによって、高い利得を獲得し、ニッチを形成する。そして、それは模倣学習によって、隣から隣へと広がっていき、やがて社会全体へと広がっていく、このことによってパレート最適解上の再帰点は、優性な要因として、すべてのエージェントへと広まつていき、メタ・ルールを形成し、共進化するに至ったと考えられる。

## 7. おわりに

本論文では、各相互作用下での、協調状態成立のための条件及び、共進化のプロセスを明らかにした。

今後の課題としては、経路依存をしないような共進化のメカニズムの解明、及びエージェントの記憶領域を広げた際に獲得されるメタ・ルールの解析などが挙げられる。

## 文 献

- [1] ドーキンズ R, “利己的な遺伝子、日高敏隆、岸油二、羽田節子、垂水雄二訳、紀伊国屋書店、1991
- [2] Epstein J.M. and Axtell R, “人工社会、服部正太、木村香代子、構造計画研究所、1999
- [3] R.アクセルロッド, “つきあい方の科学、松田裕之訳、ミネルヴァ書房、1998
- [4] Richard J.Gaylord and Louis J.D'Andria: *Simulating Society*, Springer-Verlag New York, Inc. 1998.
- [5] 上田 恵介, “花・鳥・虫のしがらみ進化論、築地書館、1995
- [6] 岡田 章, “ゲーム理論、有斐閣、1996.
- [7] 武藤 滋夫, “ゲーム理論入門、日本経済新聞社、2001
- [8] 出口 弘, “複雑系としての経済学、pp.87-102、日科技連出版社、2000.
- [9] 村上幸一・佐藤浩・生天目章, 「模倣学習と共進化に関する研究」電子情報通信学会技術研究報告[AI2001] pp89-96.

- [10] Murakami Y., Sato H., and Namatame A., “Co-evolution in Negotiation Games”, “Fourth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications no24, pp241-245, Yokosuka, Japan, Oct.2001.
- [11] Murakami Y., Sato H., and Namatame A., “Co-evolution in Hawk-Dove Games in a Mobile Environment” The 5<sup>th</sup> Australia-Japan Joint Workshop on Intelligent & Evolutionary Systems, Otago, New Zealand, pp 19-25 2001
- [12] Uno K., and Namatame A., "Evolutionary Behaviors Emerged through Strategic Interactions in the Large", GECCO'99 Workshop on Artificial life,