

集合行為問題におけるタグメカニズムと 協調の形成に関する考察

濱田 貴広[†] 川村 秀憲[†] 山本 雅人[†] 大内 東[†]

[†] 北海道大学大学院工学研究科

〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

E-mail: †{hamada,kawamura,masahito,ohuchi}@complex.eng.hokudai.ac.jp

あらまし 個々のプレイヤーの相互作用が、囚人のジレンマゲームで表わされる社会において、タグという明示的には意味を持たない外見上の特徴に基づく意思決定が、集団全体に及ぼす影響を考察する。個々のプレイヤーは「0」または「1」という単純なタグを持っていて、どの相手からも可視である。このタグをもプレイヤーの集団に占める割合の違いが、つまり多数派と少数派が無作為に相互作用することが、集団に対してどのような影響を及ぼすのか、このような環境下でプレイヤーが高い利得を得るには多数派が有利なのか少数派が有利なのかということ、戦略の進化を同集団のプレイヤー間でのみ行なうという設定で計算機実験により吟味する。

キーワード タグ, ゲーム理論, 囚人のジレンマゲーム, マルチエージェント

A Study on Cooperation in Collective Behavior Problem Based on Tag Based Mechanism

Takahiro HAMADA[†], Hidenori KAWAMURA[†], Masahito YAMAMOTO[†], and Azuma OHUCHI[†]

[†] Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Japan.

Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628 Japan

E-mail: †{hamada,kawamura,masahito,ohuchi}@complex.eng.hokudai.ac.jp

Abstract A simple model of tag-mediated decision making for players playing the one-shot prisoner's dilemma game is described. In our simulation, tags, which are visible from each other, and there is no relation between the player's tag and the one's strategy firstly. The player's decision making is based on the partner's tag, and the player's strategy is evolved within the same tag members. We examine the effect of the difference in the rate, which is the number of the members having the same tag, and consider which is more advantageous between the minority group and majority one.

Key words Tag based Mechanism, Game Theory, Prisoner's Dilemma Game, Multi Agent

1. はじめに

近年、複数の適応的エージェントが互いに相互作用するエージェントベースのシミュレーションによって、社会的、生態的に複雑な現象を分析する事が期待されている。そのようなシミュレーションにおいて、重要な振舞いの一つがエージェント間の相互作用である。エージェント間の相互作用は創発現象を誘発するものとしてしばしば研究されている。エージェント間の相互作用が各々のエージェント内部のシステムに独立に記述されている場合、その相互作用と創発現象の全体的な関係を分析する手法として、相互作用の積み重ねからなる創発現象を分析する方法であるゲーム理論が期待されている。ゲーム理論は、

各エージェントの合理的な意思決定が相手に対する信念や期待に拠るような状況を分析する手法の一つである。

社会的なエージェントを考えた場合、絶えず変化する環境の中で適応的な関係を形成するためには相互にコミュニケーションをとることが望ましいが、現実にはコミュニケーションできない場合も多い。しかし、そのような場合でも、何らかの形で相手の情報を収集したり、また、無意識のうちに自分の情報を発信している。そして、このことがコミュニケーションに準ずる効果を挙げている。このような、ゼロコストもしくは無視可能な低コストでの相互情報交換をゲーム理論ではチープ・トークと呼ぶ[1], [2]。例えば、人間どうしのつきあいでは、性別、年齢、肌の色、服装、しぐさなど外見上の特徴にしばしば左右

される。特に、初対面の人とつきあうとき、同様の特徴をもった人とは以前はこのようにつきあいかたをしてきたから、今度の相手も同じように振舞うだろう、などと予測をたてたりする。これを理論的に解釈すると、「外見上の特徴から、相手の戦略について事前に有用な情報が得られるはずだ^(注1)」、ということになる[3]。

本稿では、このような自己の戦略とは明示的な関係のないタグという可視な特徴をもつプレイヤー集団において、そのタグに基づいた戦略による相互作用が、タグで分別される集団の規模の違い、多数派と少数派の間にもどのような結果をもたらすのかを吟味する。また、情報交換は同集団内で行なわれることが一般的であると仮定して、プレイヤーの戦略の進化は同じタグを持つものどうしで行なわれるものとする。

2. 従来研究

タグに関する研究、つまり、相手から可視なある特徴(タグ)をもつエージェントどうしの相互作用に関する研究は、大きく2つに分類できる。エージェントどうしの相互作用にゲーム的状况を含まないものとゲーム的状况を含んだものである。さらに後者に関しては、タグの用途でさらに2つに分化できる。

2.1 ゲーム的状况に基づかない研究

これは、ある何らかの特徴を示すタグの空間的な広がり方に対するパターンに着目した研究であり、代表的なものはAxelrodのACM(Adaptive Cultural Model)[4]で、2次元格子状に配置されたエージェントが近傍のエージェントとタグの一部を交換することによって文化やそれに準ずるものの伝播の様相や収束狀況に関する研究を行なっている。また、ACMを発展させて、マスメディアの効果のように大域的な情報の局所的な相互作用への影響に関する研究[5]も行なわれている。

2.2 ゲーム的状况に基づいた研究

エージェントどうしのゲーム的な相互作用において、タグに対する関心は2つある。一つは、対戦の相手を自己と相手のタグの類似性に基づいて選択するものである。もう一つは、相手のタグの特徴に応じて選択的に戦略を決定するものである。まず、タグを考慮しないエージェント集団のゲーム的な相互作用に関する研究では、相手の選択手法としてエージェントは近傍の相手と相互作用するようなバイアスをもつ空間的なトポロジーに配置されることを前提とした設定がある[6],[7]。また、エージェントは特定の相手の認識や過去の経験に基づく相互作用にバイアスを与えることで相手を選択するものがある[8],[9],[10]。これに対してタグに基づいた相手の選択は、エージェントが互いに相互作用することを好む(近い)、又は好まない(遠い)といったある種の抽象的なトポロジーをつくりだす効果がある。つまり、プレイヤーは相手の選択にバイアスをかける任意のタグに対して選好をとるようになる。この研究では、しばしば囚人のジレンマゲームが採用されている。Rioloらは繰り返し囚人のジレンマゲームにおいてタグを用いることで協調が形成さ

	C	D
C	3, 3	1, 4
D	4, 1	2, 2

図1 囚人のジレンマゲームの利得行列

れることを示し[11], Alkemadeらはエージェントの戦略の進化に用いている遺伝的アルゴリズムの交叉のオペレータにおいて、同じタグをもつペアで交叉を行うとより協調的な戦略が集団中に広がることを示した[12]。また、Halesはタグを絶対的な値として認識する設定では、タグの種類が十分多いならば1回ゲームでも協調的なエージェント社会が形成されうことを示し[13]。これらの研究では、タグはゲームを行なう相手を選択するためにあるものであって、異なるタグを持つ相手に対して選択的に意思決定しているのではない。

一方、タグを相手の特徴としてとらえて、エージェントは自己の過去の経験に基づいて、異なるタグを持つ相手に対して選択的に意思決定する研究では、Axtellらは要求ゲームにおいて、規範の形成に関する研究を行い、2種類のタグを導入した単純な環境において、差別規範や平等規範の形成過程に関して考察して、平等規範が安定であることを結論付けている[14]。

本稿では、ビットであらわされるタグという外見上の特徴に基づく戦略によるプレイヤー間の相互作用を通して、タグで分別される集団の多数派と少数派にどのような違いをもたらすのかを考察する。ここで注意したいのは、各プレイヤーのもつ情報としての履歴は固有の相手に対するものではなく、固有のタグをもつ集団全体に対しての履歴である。つまり、集団のある1人のプレイヤーとみなした履歴であるので、プレイヤーの戦略はその集団全体に対するものである。また、相手の選択にタグを用いた研究の趣旨は、自分と同じまたは類似したタグをもつプレイヤーとの相互作用が多いことを前提していたが、本稿ではタグで分別される集団の人数比を偏らせることで、ある固有のタグをもつプレイヤーとの対戦割合を偏らせることであらず。

次章では、タグを識別して戦略を形成することの有効性を簡単な例で示す。4章では計算機実験のモデルの概要について説明する。そして、5章、6章で実験設定と、結果、考察を述べる。

3. タグの有効性の検証

まず、戦略が固定である集団に対して、戦略が進化するプレイヤー集団が適応できるかを調べる。この試行での設定を以下で説明する。ゲームを行なうプレイヤー集団は100人で、その内わけは、試行中戦略が進化するプレイヤーが90人、固定の戦略で意思決定を行なうプレイヤーが10人で、前者を集団A、後者を集団Bとする。この集団Aと集団Bの間で囚人のジレンマゲームを行なう。利得行列は図1の通りである。各プレイヤーのとりうる手は $S = \{C, D\}$ (C:協調, D:裏切り)で

(注1): R. アクセルロッド著、松田 裕之 訳、『つきあい方の科学』、ミネルヴァ書房、1998年発行、P151より引用。

ALL-C	[1111]
ALL-D	[0000]
TftT	[0101]
Pavlov	[1001]

図2 固定戦略の戦略遺伝子列

ある。集団Aのプレイヤーの戦略遺伝子列は、履歴に依存して次回の手を決定する。記憶長 m の戦略は裏切りを0、協調を1として以下の2進数で表現された履歴をもつ。

$$h_m = (a_{m-1}, \dots, a_1, a_0) \quad (1)$$

ここで、 a_0 は前回の相手の手、 a_1 は前回の自分の手、 a_2 は前々回の相手の手...とする。ある履歴 k に対応して次回出すべき手を A_k (0 または 1) とすると、記憶長 m の戦略は、

$$[A_0 A_1 \dots A_{n-1}] (n = 2^m) \quad (2)$$

で表現できる。これを戦略遺伝子列とする。また、本稿では以後 $m = 2$ とする。集団Aのプレイヤーの戦略は遺伝的アルゴリズムで進化するが、世代数は200で、オペレータはルーレット選択、一点交叉(交叉率:0.5)、突然変異(突然変異率:0.01)とする。

次に集団Bの戦略について説明する。集団Bのプレイヤーの戦略は、試行中は進化しない。戦略の種類はALL-C、ALL-D、Tit for Tat、Pavlov 戦略の4つで、戦略遺伝子列は図2の通りである。また、これらの戦略を選択したのは、どんな戦略に対しても一樣な手を提示するものと、より適応的であるとの評のある戦略を混在させることで、集団B全体としての戦略の複雑さを表現することを意図しているからである。

固定集団Bの10人のプレイヤーに対してどのように戦略が割り当てられているか、つまり、集団Bの戦略の乱雑さをエントロピー H で表わす。10人に占める戦略の割合を p_i ($i = 1, 2, 3, 4$) で表わす。ALL-C、ALL-D、Tit for Tat、Pavlov の割合をそれぞれ p_1, p_2, p_3, p_4 とすると、集団Bの戦略の乱雑さを示すエントロピー H は、

$$H = -\sum_{i=1}^4 p_i \log_2 p_i \quad (3)$$

となる。集団Bに対する戦略の割り当て方は重複組合せで、 ${}^4H_{10} = 286$ 通り、それに対するエントロピー H の値は22通りである。これらすべての場合について試行するが、各世代において、集団Aのプレイヤーはそれぞれ、集団Bのプレイヤーと1回PDゲームを相手をランダムにかえて100回行なう。集団Aの各プレイヤーのもつ履歴は固有の相手に対するものではなく、集団B全体に対する履歴である。つまり、集団Bをある1人のプレイヤーとみなした履歴であるので、集団Aのプレイヤーの戦略は集団B全体に対するものである。このことは集団Bについても同様である。

図3は、横軸が集団Bの戦略の乱雑さを示すエントロピー H で、縦軸が集団Aのプレイヤーの平均利得の10試行の平均である。集団Bの戦略の乱雑さが小さいほど、より多くの利得を

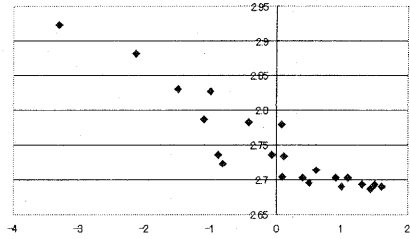


図3 集団Aの平均利得 (10 試行平均)

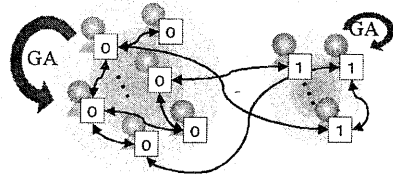


図4 計算機実験の概念図

表1 実験の設定

	[0]	[1]
設定1	100	0
設定2	90	10
設定3	80	20
設定4	70	30
設定5	60	40
設定6	50	50

獲得できて、戦略の乱雑さが大きくなるほど得られた利得が少なくなっていることがわかる。

この集団Bをある種のタグと考えた場合、この結果は、相手集団の戦略の乱雑さが小さいなら1回のPDゲームでも、適応的な戦略を獲得できることを示すものである。

4. 計算機実験のモデル

本節では、プレイヤーのゲーム環境とプレイヤーの戦略、そしてその進化過程について説明する。

4.1 ゲーム環境

集団全体において、プレイヤーの特徴を示すタグの種類は $T = 2$ 、各プレイヤーはこのいずれかのタグを身につけていて、どのプレイヤーからも可視である。全プレイヤーの人数は $P = 100$ 人で、タグはある割合ですべてのプレイヤーに割り当てられる。集団中に存在するタグの種類は表1の通りである。また、図4に計算機実験の概念図を示す。プレイヤー間の相互作用は四人のジレンマゲーム(前節の図1)とする。

この設定により、集団中に存在するタグの割合の違いから、プレイヤーの戦略とは初期状態では相関のない特徴であるタグに基づく意思決定がタグで分別される集団間にどのような効果をもたらすのかを検証する。

基本となるタイムステップは世代である。0世代目で P 人が

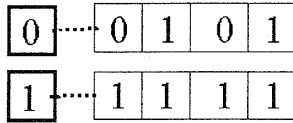


図5 プレイヤーの戦略遺伝子列

らなる初期集団が形成される。各世代 g で、プレイヤーは自分以外のプレイヤーと1回PDゲームを $time$ 回行なう。

各プレイヤーの適応度は、その世代で得た平均利得とする。次の世代 $g+1$ の集団を形成するためにプレイヤーの適応度を用いて遺伝的アルゴリズムを使用する。また、最終世代を G とする。以下に計算機実験の流れを示す。

```

P(0) = GenerateRandomP
for each Generation g
  for each individual i from P(g)
    j = GetOtherToPlayRandomly()
    Play(i,j)
    UpdateCummulativeScores(i,j)
  end for
end for
setFitnessToNormalizedScores
P(g+1) = ApplyGeneticAlgorithm(P(g))
end for

```

プレイヤーは任意に相手を選択してその相手とゲームを行なう。なおこの設定では、各プレイヤーはこのゲームを $times$ 回行なう。つまり、各プレイヤーは平均 $times * 2$ 回ゲームを行なうことになる。

4.2 プレイヤーとその戦略

集団中にあるタグの種類は $\{0,1\}$ で、プレイヤーはそれぞれのタグに対して記憶長 $m=2$ の履歴をもっているの、プレイヤーの戦略遺伝子列の長さは8となる。ただし、設定1の場合はプレイヤーの戦略遺伝子列は4ビットである。例えば図5に表わされる戦略遺伝子列は、タグ「0」の集団に対してはTFTを、タグ「1」の集団に対してはALL-Cをとる戦略を示している。この設定により、プレイヤーの戦略はプレイヤー個人に対してではなく、固有のタグを持つ集団に対するものとなり、その集団と繰り返しゲームをおこなっているものとみなす。

4.3 戦略の進化過程

遺伝的アルゴリズムを用いて適応的にプレイヤーの戦略を進化させる。使用するオペレータはルーレット選択、二点交叉、突然変異である。プレイヤーは個人合理的な存在を前提とする。したがって、適応度の高いプレイヤーの戦略ほど次世代の残る。ここでの適応度は1世代内で獲得した平均利得とする。あるタグを特定の予測に結びつける方法として、一般的に直接個人の経験から学びとるものと、人づてに過去に得た経験から形成されるといった二通りがあるが、後者に関しては社会化の過程で同質の特徴を持つ相手から獲得されることが多い。以上を踏ま

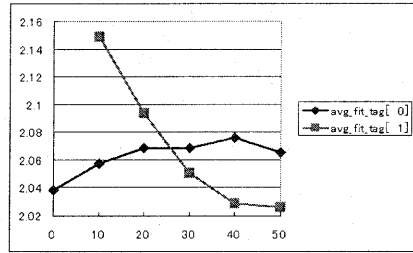


図6 平均利得

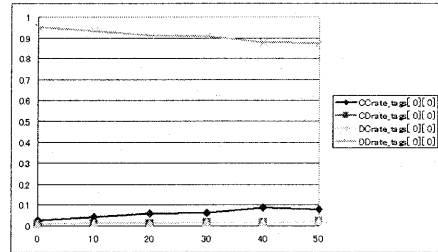


図7 タグ0の同集団に対する提示した手の割合 (30 試行平均)

えて、遺伝的アルゴリズムの操作は同じタグを持つ集団内でおこなうことにする。選択は自分より高い適応度を採る戦略を模倣することを、交叉はプレイヤー間での部分的な情報交換を、そして突然変異は独自に戦略を変更することを示唆している。

遺伝的アルゴリズムのパラメータは、交叉率 $p_c = 0.5$ 、突然変異率 $p_m = 0.001$ 、そして世代数 $G = 10000$ とする。また、試行回数は30回である。

5. 計算機実験とその結果

図6は、各集団の全世代における平均利得の30試行の平均を求めたものである。縦軸は各タグ集団の平均利得で、横軸はタグ1をもつプレイヤーの人数である。この結果より、ほとんどの設定において、プレイヤーは互いに裏切りを提示する集団になっていると考えられる。それは、互いに協調をとる誘因、例えば同じ相手と繰り返しゲームを行なうといった設定がないからである。しかし、ごくわずかであるが、タグ1をもつ少数派とタグ0をもつ多数派の人数比が大きいとき、平均利得に差があるのが確認された。つまり、タグ1をもつプレイヤーが集団全体に対して少数派であるとき、多数派のタグ0をもつ集団に対してやや平均利得が上回った。そこで今度は、各プレイヤーがそれぞれのタグに対して何らかの異なる戦略をもつようになったためなのかを確認するために、各ゲームで2人のプレイヤーの提示した手の割合について見てみる。

図7は、全世代に対して、タグ0の集団のプレイヤーが同集団のプレイヤーとのゲームで互いに協調を提示した割合、自分は協調を提示して相手は裏切りを提示した割合、その逆の割合、そして互いに裏切りを提示した割合の30試行の平均を求めたものである。同様に、図8は、タグ0の集団のプレイヤーがタグ1の集団のプレイヤーに対するそれぞれの割合を、図9は、

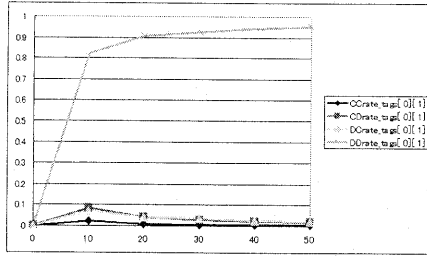


図 8 タグ 0 のタグ 1 に対する提示した手の割合 (30 試行平均)

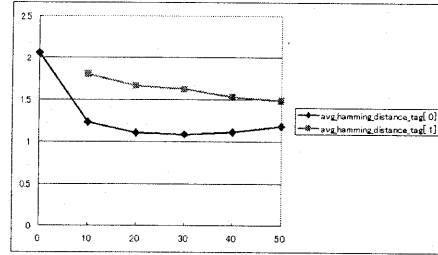


図 11 戦略遺伝子列のハミング距離 (30 試行平均)

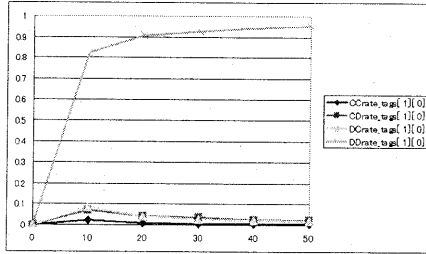


図 9 タグ 1 のタグ 0 に対する提示した手の割合 (30 試行平均)

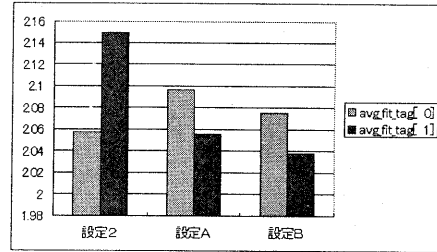


図 12 追加設定による平均利得 (30 試行平均)

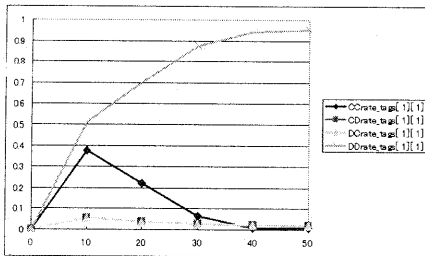


図 10 タグ 1 の同集団に対する提示した手の割合 (30 試行平均)

タグ 1 の集団のプレイヤーがタグ 0 の集団のプレイヤーに対するそれぞれの割合を、図 10 は、タグ 1 の集団のプレイヤーが同集団のプレイヤーに対するそれぞれの割合を示したものである。以上の 4 つの図は、縦軸は提示した手の組の割合で、横軸はタグ 1 をもつプレイヤーの人数である。これらの図より、同じタグを持つプレイヤー集団の規模が大きいほど、同じ集団に対しても、異なるタグの集団に対しても、互いに裏切ることがわかる。しかし、図 10 より、少数派の集団ではわずかであるが、同じタグを持つプレイヤーどうしでは互いに協調する傾向が、他の場合に比べて多くみられた。

図 11 は各タグの集団のプレイヤーのタグ 0 に対する戦略遺伝子列とタグ 1 に対するそのハミング距離を計算したものである。縦軸が全世界に対する各タグの集団のプレイヤーのハミング距離の平均値で、横軸がタグ 1 をもつプレイヤーの人数である。これは、各プレイヤーのタグ 0 に対する戦略とタグ 1 に対する戦略の違いをプレイヤーの戦略遺伝子列から測るためのものである。これより、少数派集団のプレイヤーの戦略は多数派集団のそれよりも各タグに対する戦略が異なっていることを示している。つまり、少数派集団のプレイヤーはタグに対して

選択的に意思決定しているものと考えられる。

6. 追加実験

以上より、同じタグをもつプレイヤーが集団全体に対して少数派であるとき、同集団に対しては互いに協調をとる傾向があることがわかった。この実験設定では、ゲームの対戦相手はランダムに選択されるので、タグ 1 が少数派であるときタグ 0 をもつプレイヤーは同集団の相手と、タグ 1 の集団はタグ 0 をもつプレイヤーと対戦する機会が多くなる。この結果が、対戦相手のタグの種類にバイアスがかかったためにこのような結果になったのか、それとも戦略を進化させるために用いている遺伝的アルゴリズムの集団サイズによる影響なのかを見てみる。ここでさらに、新たに 2 つの設定で計算機実験を試みる。一つ目は、タグ 0、タグ 1 の集団の人数をそれぞれ 50 人ずつとして、対戦する相手に関しては、どのプレイヤーも 90 % の確率でタグ 0 をもつ任意のプレイヤーとゲームを行なうものとする。これは遺伝的アルゴリズムにおける集団サイズを一定にして、対戦相手の選択確率にバイアスをかけたものである。二つ目は、タグ 0、タグ 1 の集団の人数をそれぞれ 90 人、10 人として、対戦する相手に関しては、どのプレイヤーも 50 % の確率でタグ 0 をもつ任意のプレイヤーとゲームを行なうものとする。これは遺伝的アルゴリズムにおける集団サイズにバイアスをかけ、対戦相手の選択確率は等しくしたものである。これらをそれぞれ設定 A、設定 B とする。

これらの設定による結果と、設定 2 のそれを比較する。

図 12、図 13、そして図 14 は、それぞれ、設定 2、A、B における全世界に対する各タグの集団の平均利得、タグ 0 の同集団に対する提示した手の割合、タグ 1 の同集団に対する提示した手の割合を 30 試行における平均値を算出したものである。

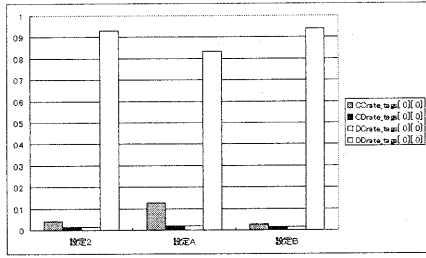


図 13 追加設定によるタグ0の同集団に対する提示した手の割合 (30 試行平均)

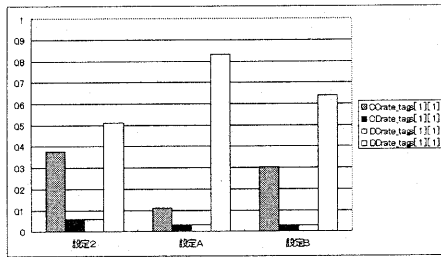


図 14 追加設定によるタグ1の同集団に対する提示した手の割合 (30 試行平均)

以上の結果より、平均利得に関しては設定A、Bともにタグ1の集団の平均利得が、タグ0の集団のそれを下回った。また、設定Aでは、タグ0のプレイヤーどうしの協調の割合が他の設定に比べてわずかに多く、設定Bでは、タグ1のプレイヤーが同集団の相手に対して互いに協調をとった割合は、設定Aのときに比べて設定2に近い結果となった。したがって、設定2で上述のような結果が得られたのは、異なるタグの相手と対戦する確率が要因というよりも、戦略の進化における集団のサイズが要因となっているものと考えられる。本稿では、集団サイズの違いによる遺伝的アルゴリズムの効果を、少数派集団では多数は集団に比べて（戦略に関する）情報が伝わるスピードが速いということと解釈している。したがって、今回の結果からは、同じタグをもつプレイヤー数が少ないこと、つまりそのプレイヤーが集団全体に対して少数派であるほど、互いの情報交換のスピードが多数派集団のそれに比べて速いことが、同集団に対して互いに協調をとる機会が増えるので、多数派よりも利得の高い集団を形成できることが示された。

7. おわりに

タグに基づいて意思決定をするプレイヤーの囚人のジレンマゲームにおける相互作用を扱った。タグで分別される集団間において、集団サイズの違いから得られる利得が異なることを示した。少数派集団の方が多数派集団より、集団内で互いに協調をとる機会が多いことが集団間での利得の差であることがわかったが、これは、対戦相手の選択に対するバイアスよりも、遺伝的アルゴリズムにおける集団サイズの影響が原因であることが明らかとなった。これは、少数派集団内の方が互いの情報交換

のスピードが速いためである。

今回の計算機実験では、試行回数が少なかつたため、やや疑問の残る結果となったが、今後は十分な回数の試行を試みる。

文 献

- [1] 小山 友介, “エージェントシミュレーションによる「チープ・トーク」モデルの拡張” 第10回マルチ・エージェントと協調計算ワークショップ, 2001.
- [2] 岩崎 敦, 小田 宗兵衛, 上田 完次, “強化学習にもとづくプレイヤーのチープトークゲームにおける振舞いに関する考察: 被験者実験と計算機実験の比較.” 計測自動制御学会論文集, Vol.33,1997.
- [3] 亀田 達也, 村田光二, “複雑さに挑む社会心理学,” 有斐閣, 東京, 2000.
- [4] R. Axelrod, “The Dissemination of Culture: A Model with Local Convergence and Global Polarization,” Journal of Conflict resolution, Vol. 41,1997.
- [5] Y. Shibana, S. Yasuno, I. Ishiguro, “Effects of Global Information Feedback on Diversity,” Journal of Conflict resolution, Vol. 45,2001.
- [6] 鈴木 麗瑠, 有田 隆也, “N人版繰り返し囚人のジレンマゲームにおける空間的局所性の影響とその進化”, 電子情報通信学会技術研究報告,2001
- [7] 生天目 章, “戦略的相互作用とマイクロ・マクロ・ループの自己組織性,” セルオートマトン・シンポジウム 講演論文集, A105, pp.30-35, Nov, 2001.
- [8] D. Ashlock, M. D. Smucker, E. A. Stanley, L. Tesfatsion, “Preferential Partner selection in an Evolutionary Study of Prisoner’s Dilemma,” RePEc ,1995.
- [9] 石川 久夫, 中理 達生, 中島 智晴, “空間型繰り返し囚人のジレンマゲームにおける隣接プレイヤー間での信頼関係のモデル化,” 電子情報通信学会論文集, Vol. J83-D-1, 2000.
- [10] M. A. Nowak, K. Sigmund, “Evolution of Indirect Reciprocity by Image Scoring/ The Dynamics of Indirect Reciprocity,” RePEc, 1998.
- [11] R. L. Riolo, “The Effects of Tag-Mediated Selection of Partners in Evolving Populations Playing the Iterated Prisoner’s Dilemma,” SFI Working Paper, 1997.
- [12] F. Alkemade D. D. B. van Bragt J. A. La Poutre, “Stabilization of Tag-Mediated Interaction by Sexual Reproduction in an Evolutionary Agent Systems,” CWI Reports, 2000.
- [13] D. Hales, “Cooperation Without Memory or Space: Tags, Groups and the Prisoner’s Dilemma,” MABS, Boston, 2000.
- [14] R. Axtell, J. M. Epstein, H. P. Young, “The Emergence of Classes in a Multi-Agent Bargaining Model,” CSED Working Paper No. 9,2000.