

タグは協調創発に有効か？

谷本 潤

他者との形態上の識別システムであるタグが協調の創発に有効であるかを2x2ゲームにおいて検討した。タグ・システムはRioloら(2001)が提示した実数値のTag, 戦略として実数のタグ識別解像度Torを保持し, これらとともに適応させる機構でモデル化した。戦略上AllDを許容するか否かで系の協調率は大きく異なり, Green Beard Effectが存在しないとの立場でAllD戦略を許容するならば, ①Rioloらの報告ほどタグによる協調のサポート効果は高くないこと, ②ただし, Leaderゲームの領域では解析解に較べて高頻にAlternating Reciprocityを現出させること, ③タグを二次元的に導入すると協調サポート効果は向上することを示した。

Does Tag system work effective to emerge cooperation?

Jun Tanimoto[†]

Whether the so-called Tag System can support to emerge cooperation is investigated concerned on 2×2 games. As the Tag System, what Riolo et al. (2001) proposed is assumed fundamentally, in which an agent has both Tag and Tor defined by $[0,1]$ real numbers. Tor is a tolerance to recognize an opponent as a company. Both Tag and Tor are assumed to be evolving. Results show that tag's effectiveness depends on whether we allow AllD strategy in the system. If we allow AllD that implies Green Beard Effect does not work in the system, following things are implied; (1) the tag's effectiveness is meager than Riolo et al. reported, (2) Tag System can bring significant Alternating Reciprocity than the analytic solution in a Leader game; (3) the system using 2D tag space is more effectively support a cooperation that the usual Tag System.

キーワード: タグ, 2×2 ゲーム, 協調, 擬態戦略
Key words: Tag, 2×2 game, Cooperation, Mimic strategy

1. 緒言

ジレンマゲーム研究は, 進化ゲーム理論の枠組みにとどまらず, 数理生物学, 情報科学, 非線形物理学, 経済学をはじめとする社会科学等々, 広範な適用対象の裾野を有する学際領域である。学習を含む付加的なゲームの枠組みがエージェントをして Nash 均衡から脱せしめ協調社会を創発させるプロセスが明らかにされれば, 大域的最適を達成する上で個別分散メカニズムが有力であることになるから, 情報科学の工学的応用という観点からもその意味は小さくないと考えられる。

ジレンマゲームで協調が創発するメカニズムはこれまで血縁淘汰 (kin election)¹⁾ や互恵 (reciprocity) 的他利主義²⁾ により説明が試みられてきた。Axelrod³⁾ は 2 人繰り返し囚人ジレンマ (Prisoner's Dilemma, 以下 PD) ゲーム (2-IPD) において Tit-for-Tat (TFT) が有効なのは, 協力 (Cooperation, 以下 C) には C で応じ, 裏切り (Defect, 以下 D) には D で応じるしっぺ返しが有効に機能し, 将来にわたって繰り返し対戦する相手に対しては, 自ら C を出すことで相手の C を期待するとの直接的互恵 (direct reciprocity) 関係が創発し得るからであると説明した。繰り返し対戦に限らず, 空間構造化⁴⁾, ネットワーク化⁵⁾ など多くのゲーム機構上のオプションは, その何れもが, 基本的には対戦相手を制限することで直接的互恵関係が構築され, それにより協調が創発されるメカニズムに依っていると云える。

本論で注目するタグ・システムも, 対戦相手を制限する枠組みの一つである。タグ・システムとは, 対戦相手の表象 (タグにより表される) を識別し, それに応じて行動を切り替える (戦略により表される) 機構である。複雑な認知機構やメモリ, 学習等の知性を前提にしないメカニズムであるため, 一般

の生物システムにおける互恵創発の一論拠と考えられてきた。しかし, Dawkins⁶⁾ が指摘するように生物学的には Green Beard Effect の仮定なしにはタグ・システムによる協調の進化は困難であると思われる。すなわち, 遺伝プロセスの中で表象と戦略の形質が独立に継承されていくならば, 擬態 (mimic) 戦略 (協調戦略の表象を装いながら裏切り戦略を採るエージェント) の発生は不可避であるから, 表象と戦略がセットになって遺伝していく構造を前提にせざるを得ない (“青ひげ”と “他人に対して親切にする” 特徴とを同時に発現させる遺伝子が存在しなければならぬ) と云うものである。このような遺伝子の多形質発現効果は理論的には可能であるが, それにより生物システムにおいてタグによる互恵機構が進化したとすることは生物学者達はやや懐疑的である。

このような背景の中で本論では, “タグ・システムは利己のエージェント社会に互恵を創発させる上で果たして有効なメカニズムたり得るのだろうか?” なる最も基本的な問いについて考えてみたい。

タグによる他者識別機構の問題点として, まず, 表象が対戦相手の戦略に関する情報を直接含んでいない (故に単純な情報処理機構で済む) 点を指摘しなければならない。このため, 表象を騙る mimic の侵入を許してしまう余地が残る。Nowak & Sigmund⁷⁾ の Reputation System (以下, RS) では, 各エージェントの対戦履歴を反映した Image Score (以下, IS) が集団全員に開示される。IS による RS では情報の高質化 (相手戦略に関する情報を含んでいるという意味) により, C を互いに出す協調を前提にした場合 (つまり PD を主とするゲームでは), 後段述べるようにタグ・システムに較べて頑強な互恵を達成することが出来る。しかし, RS はタグ・システムに較べるとエージェントに遙かに複雑な情報処理機

[†] 九州大学大学院総合理工学研究院・教授・工博

Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Dr.Eng.

構を要求する（加えて、Nakamaru ら⁸⁾が検討しているように意図的に偽の噂を流布させることが可能になると mimic 戦略により互惠社会は崩壊する可能性がある）。

タグによる識別機構の第二の問題点は、情報の粗さ（換言すると認知機構の解像度）である。単純な生物システムを前提にするなら、タグにより識別出来る情報は大きくはないとすべきであろう。これはモデル上はタグの種類（例えば、毛色が赤、青、黄色等のバリエーションを持つ）を制限することと等価である。Baalen ら⁹⁾は鳥類の warm call の進化を検討する際に信号（啼き方に相当）は 2 種に限定して議論している（彼らのモデルではタグ・システムに加え空間構造が仮定されている）。

しかし、タグ・システムの本質を理解する上では、第一の問題がより重要であり、そのためには第二の問題点の影響は中立化した上で検討する必要がある。Riolo ら¹⁰⁾のモデルでは、エージェントは実数 $[0,1]$ で定義されるタグ (Tag) を有し、対戦相手も同タグであると識別する認知限界 Tor も実数 $[0,1]$ で定義して、両者 (Tag と Tor) をともに適応させることで、離散的でない無限のタグ空間と戦略空間を模擬している（従って、このモデルでは Tor を上下させることが他者に対して協調的か否かの戦略を意味する。 $Tor=1$ は AIC に相当する）。本論でもタグ・システムの基本構造は彼らに倣う。

ところで、Riolo らはモデル実験によりタグ・システムにより互惠社会の構築が可能であるとしている。しかし、彼らのモデルでは、Roberts ら¹¹⁾が指摘する通り、他の Tag の差の絶対値が自分の Tor (未満でなく) 以下の場合に協調 (Cooperation, 以下 C) することが仮定されていて、全く同一タグの相手に対して $Tor=0$ のエージェントですら C を出すことになって、戦略上 AHD (相手タグに関係なく常に D 出す) が存在しないことが前提になっている。これは、言葉を換えると Green Beard Effect を前提にしているとも云える。この点については後に詳しく述べる。

2. モデル

n エージェントからなる完全混合集団を考える。エージェントは属性値として $[0,1]$ の実数で定義された Tag と Tor とを持つ（初期分布は一様とする）。各エージェントはランダムに対戦相手を決め、one-shot の 2x2 ゲームを行う。ゲームでは、 $|Tag_{focal} - Tag_{opp}| < Tor_{focal}$ (添え字 focal は自分, opp は相手を意味する) のときだけ、各エージェントは C を出す。また、Tag の端点はループ処理する（例えば、 $Tag=0.9$, $Tor=0.3$ のエージェントは $Tag=0.1$ のエージェントに対して C を出す）。このゲーム対戦を 1 世代の間に m 回繰り返す、得られた利得の平均値を適合度に、繰り返しレレット選択による淘汰を行い、次世代の個体 n エージェントを決定する。これらの個体のタグには p_{tag} の確率で突然変異が発生し、その場合は新たなタグは $[0,1]$ の一様乱数とする。また、認知限界にも p_{tor} の確率で突然変異が発生し、その場合の新たな Tor はそれまでの Tor に、平均 0, 標準偏差 0.01 のガウス分布に従う正規乱数を加えた値とする。

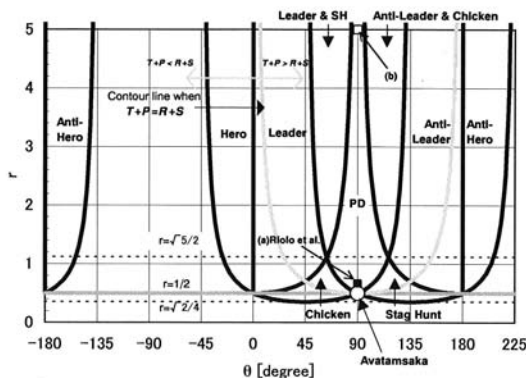


図1 θ と r による 2x2 ゲームの表記。

Fig.1 The scene of 2x2 game world.

ゲーム構造に関しては、利得を自他の手組により P (自手 D; 相手 D), R (自手 C; 相手 C), S (自手 C; 相手 D), T (自手 D; 相手 C) で表すなら、Tanimoto & Sagara¹²⁾の記法に依り、

$$P = x_0 - 0.5 \cdot r_1 \cdot \cos(45) \quad \dots (1-1)$$

$$R = x_0 + 0.5 \cdot r_1 \cdot \cos(45) \quad \dots (1-2)$$

$$S = x_0 + r_2 \cdot \cos(45 + \theta) \quad \dots (1-3)$$

$$T = x_0 + r_2 \cdot \sin(45 + \theta) \quad \dots (1-4)$$

のように、全ての 2x2 ゲームはパラメータ θ [deg] と r ($r = r_2 / r_1$) で表すことが出来る (x_0 は解可能域がシフトするだけで P, R, S, T の相対関係は意味がなく、 $r = r_2 / r_1$ なる正規化でも解可能域の相似関係は保存されるので、実質的には 2 パラメータとなる)。すなわち、図 1 である。太線で囲われジレンマゲーム名が冠されている領域以外のエリアが、ジレンマのない Trivial ゲームである。Riolo ら¹⁰⁾のモデルで取り上げられている $P=0$, $R=0.9$, $S=-0.1$, $T=1$ なるゲームは $x_0=0.45$, $r_1=1.273$, $r_2=0.778$, $\theta=90 \text{ deg}$ ($x_0=0$ とするなら $r=0.611$, $\theta=90 \text{ deg}$ の条件と等価) なる囚人のジレンマ (Prisoner's Dilemma, 以下 PD) である。

3. 実験結果及び考察

3.1. AHD 戦略の存在が及ぼす影響

$n=100$, $m=1$ とし、Riolo ら¹⁰⁾と同じ PD ゲーム (図 1 中に等価なジレンマ強さのポイントを■で示した) における 1000 世代までの協調率 (P_C), Tag と Tor の平均, Tor の標準偏差の世代推移を図 2(A) に示す。ただし、 $p_{tag} = p_{tor} = 0.05$ とした。9000 から 10000 世代の平均 P_C は 0.349 (10000 世代までの全平均 P_C は 0.333) である。同様に図 2(B) は非常に強いジレンマ性を持つ PD ($\theta=90 \text{ deg}$, $r=5$, 図 2 中に示した□) における結果で、この場合、9000 から 10000 世代の平均 P_C は 0.213 (10000 世代までの全平均 P_C は 0.250) である。さらに、図 2(C) は同じ強い PD ゲームにおいて、エージェントの TAG 戦略を " $|Tag_{focal} - Tag_{opp}| \leq Tor_{focal}$ ならば C 出す" に変更した場合で、9000 から 10000 世代の平均 P_C は 0.798 (10000 世代までの全平均 P_C は 0.788) である。

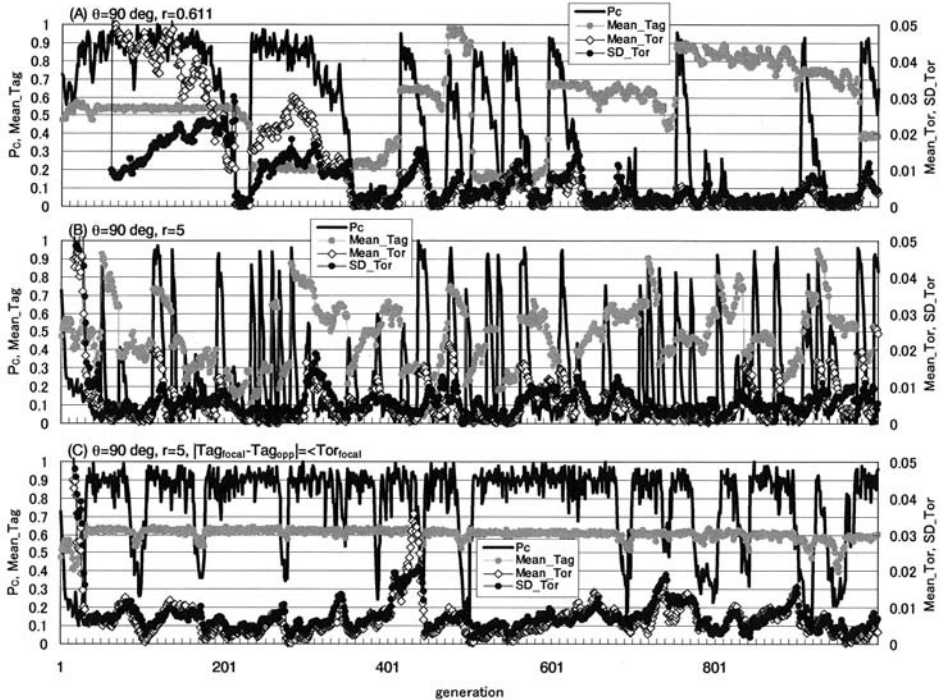


図 2 タグ・システムによる協調率(P_C), Tag と Tor の平均, Tor の標準偏差の世代推移。
 (A)Riolo らと同じ PD ジレンマ構造, (B)強い PD ジレンマ構造, (C) 強いジレンマ構造で AIID を許容しない設定。

Fig.2 Generation transitions of cooperative probability (P_C), averages of Tag and Tor and standard deviation of Tor . (A) has a same game structure of Riolo et al. that is classified as relatively weak PD. (B) has an extremely strong PD dilemma structure. (C) has same game structure of (B), but AIID cannot be defined.

図 2(A)の 100-200 世代において、一旦形成された協調が崩壊していくプロセスに注目すると、 Tor をより大きくすることで互いに C を出し合う Tag の範囲を拡げ、協調エージェントのクラスターを大きくすることにより、高い協調率が達成される。しかし、このような状況は、突然変異により Tor を小さくした (Tag はクラスター内にとどまる) 裏切り戦略エージェントの侵入を許してしまう。このエージェントはクラスター内の Tor が大きなエージェントには仲間と認知されながら、彼らから貪る (T の利得を得る) mimic である。この mimic が増え出すと、 Tor は下がり続け、協調率は低下する。しかし、裏切りの応酬になると、互いの得る利得は低下する (PD の場合は Nash 均衡に陥る、利得表で云うと P しかとれない)。このような状況で、突然変異により Tag を集団の多くが属するクラスターから離れ、かつ Tor の小さなエージェントがいない“新天地”に飛ばしたエージェント達が新たな協調クラスターを形成し、やがては低利得のエージェントを駆逐し、社会のマジョリティに取って代わる (230 世代後の協調的状態と 200 世代以前の協調状態の Tag の平均値が異なるのはこのため)。以上は、定性的には Riolo ら¹⁰⁾が報告しているプロセスと同様である。ただし、世代平均で評価した P_C は 0.3 余りであるから、勿論、タグ・システムがなく、Nash 均衡の裏切り合いにトラップされ、 $P_C=0$ となるよりはマシだとしても、大

いに高いと云うわけではなかろう。さらにジレンマが強い条件である図 2(B)をみると、基本的には社会は非協調的状態である、スパイク的イベントとして協調率の高い状況が創発する (しかし、パブルは直ぐに弾ける) と見るべきで、世代平均の協調率も 0.2 余りに落ち込んでしまう。

ところが、Riolo ら¹⁰⁾と同様、エージェントが C を出す条件を $|Tag_{focal} - Tag_{opp}| \leq Tor_{focal}$ に変更した結果である図 2(C)を図 2(B)と比較すると、劇的に P_C が向上している (基本的には社会は協調的状態である、スパイク的イベントとして協調率の低い状況が起きる)。このことからエージェントの採る戦略、すなわち TAG 戦略を規定する条件の差異が協調率に大きく影響することが分かる。これは $|Tag_{focal} - Tag_{opp}| \leq Tor_{focal}$ の条件では AIID が存在しないことにより説明付けられる。つまり、戦略空間上 $Tor=1$ により AIID の存在は許容されているから、 $|Tag_{focal} - Tag_{opp}| \leq Tor_{focal}$ の条件は非対称な戦略空間を仮定していることになり、C 側にバイアスを含んだ適応機構となってしまっているわけである。AIID が存在しない仮定とは、“全くの非寛容であっても同一タグであれば必ずどのエージェントも C を出す”ことに他ならないから、完全な mimic は存在しないことになり、Green Beard Effect が成立することを暗に仮定していることになる。その意味で、タグ・システムのモデルとしては適切で

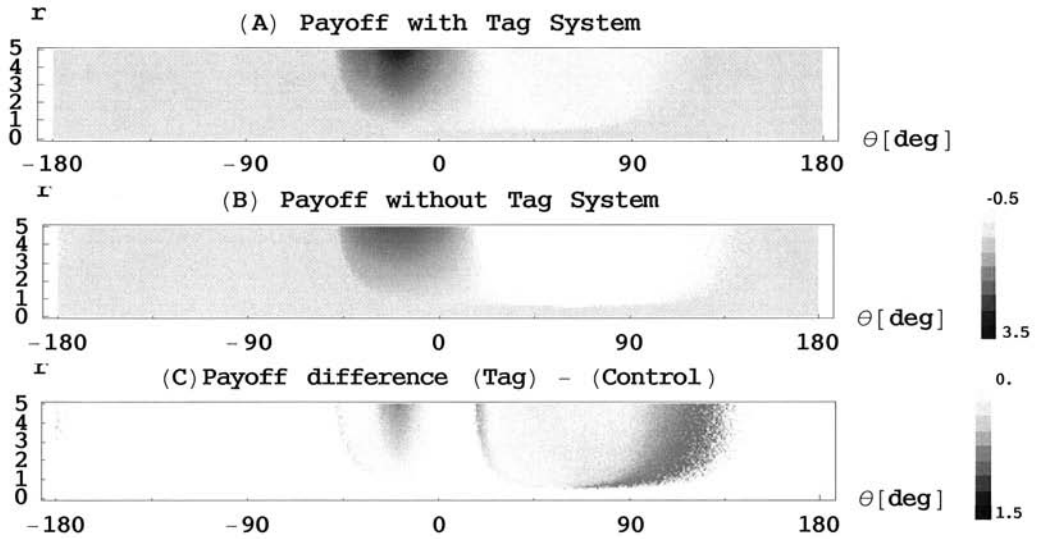


図3 タグ・システム(A)とタグのない2x2ゲーム(B)の利得, および利得差(タグあり-タグなし)(C).

Fig.3 Holistic pictures covering 2x2 game world for (A) payoff with Tag System, (B) without Tag System and (C) payoff difference, defined by (Tag - without Tag).

ないと言えよう。先述したように協調が崩壊するメカニズムは、 Tor を下げて (互いに非寛容になる) P_c が低下することにより説明される。 Tor の下げ合いになると、より早く $Tor=0$ に到達したエージェントが多くの子孫を残し、同一 Tag で $Tor=0$ のエージェントが増える。そうすると “ $|Tag_{focal} - Tag_{opp}| \leq Tor_{focal}$ のとき C 出す” 条件が利いて、協調率は俄に上昇することになる。このため図 2(C)の協調率が下がるイベント前後で Tag の平均値は大きく変化しないのである。すなわち “新天地” で別の協調クラスターを形成したグループに取って代わられることで、協調率を回復させているのではないことがわかる。

3.2. 様々なゲーム構造におけるタグ・システムの効果

図 3 は、図 2 と同じ条件設定で、図 1 に示した各ジレンマゲームを含む全てのゲームエリアについて 5 試行アンサンブル平均でみたタグ・システムがあ

る場合(A)とない場合(B) (C か D かの戦略のみ、2x2 ゲームの Replicator Dynamics の解に相当。以下、コントロール)の利得 (全エージェント平均)、および利得差(C) (=A)-(B) である。図 3(C)は繰り返しゲーム等々一切の協調をサポートする機構がない場合のゲームの帰結に対するタグ・システムの有効性を意味している。一部の領域 ($\theta=0deg$ 付近)を除いて、ジレンマの生じる領域で、タグ・システムの効果が見て取れる。

図 1 と図 3(C)とを比較しながら見ると、タグ・システムは Stag Hunt (以下、SH) 型のジレンマゲームのうち、Chicekn 型ジレンマ性のないゲーム (つまり SH, Anti-Leader や Anti-Hero) で特に有効に機能することが分かる。これらのゲームは Bi-stable な均衡を有する本来的にジレンマ性の弱いゲームエリアである¹²⁾から、mimic に脆弱なタグ・システムであってもジレンマ解消に威力を発揮したものと思われる。

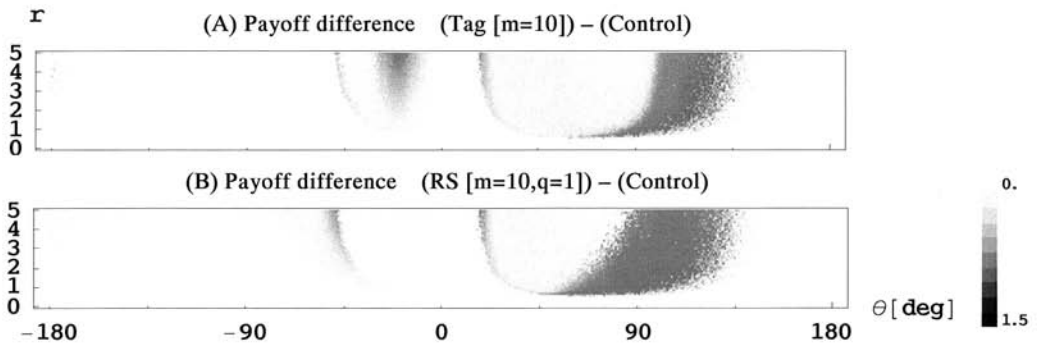


図 4 $m=10$ におけるタグ・システムと RS による 2x2 ゲーム利得とコントロールとの差異。(A) タグ・システム, (B)RS ($q=1$) .

Fig.4 Holistic pictures covering 2x2 game world for payoff difference between (A) Tag system or (B) RS ($q=1$) and Control case, when $m=10$ is assumed.

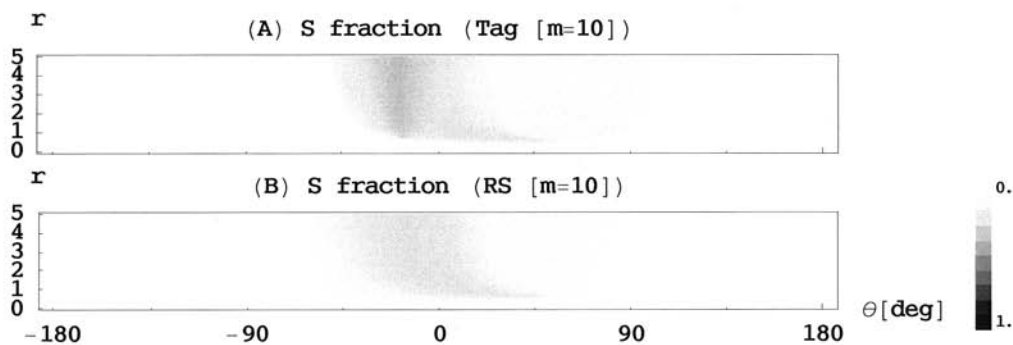


図5 $m=10$ におけるタグ・システムとRSによる2x2ゲームのS (or T) 生起確率. (A)タグ・システム, (B)RS ($q=1$) .

Fig.5 Holistic pictures covering 2x2 game world for S (or T) fraction; (A) Tag system or (B) RS ($q=1$) and Control case, when $m=10$ is assumed.

また, Chicken 型のジレンマだけが生じ, $2R < S+T$ を満たす図 3(C)の $\theta = -45 \sim 0 \text{deg}$ の Hero でタグ・システムの効果が現れている. この領域は, 文献 14)によると, 2 記憶長 5bit 戦略ゲームでは, DorC タイプ¹³⁾の $S \cdot T$ 互恵が創発するエリア ($S > T > R$, $2R < S+T$ かつ $\cos(45+\theta) > \frac{1}{r} \cdot \frac{1}{2\sqrt{2}}$ の条件を満たす領域) にほぼ重なる. コントロールでは, この領域のゲームの帰結は C と D が併存する内部均衡点になる (手組としては P, R, S, T が生じる). このことについては, 次節でも論及する.

3.3.Reputation System との比較

前述したように mimic に対して脆弱な傾向のあるタグ・システムではあるが, まったく協調のサポート機構を持たないゲームに較べればそれなりの効果が認められた. これが, 他のゲームのオプションと比較してどの程度なのかを本節では調べてみる.

ここでは, 2段階 (0=bad, 1=good) の Image Score (以下, IS) による Reputation System (以下, RS)⁷⁾を比較の対象とする. 完全混合集団の n エージェントは, 前回の自手が C ($IS=1$) だったか D ($IS=0$) だったかにより IS が付されている. タグ・システムのモデル同様, 各エージェントはランダムに対戦相

手を決め, one-shot の 2x2 ゲームを 1 世代の間に m 回繰り返す. 対戦相手の IS は確率 q で観測され, 不明の場合は p の確率で C を出す. 各エージェントは戦略 $Str = \{0, 1, 2\}$ を有し, $IS_{opp} \geq Str$ のときだけ C を出す. よって, $Str=0$ は AllC, $Str=2$ は AllD である. エージェントは世代ごとに Str を適応的に進化させる. 各世代当初の IS は 1 にリセットされる.

$m=1$ では各エージェントの期待対戦ゲーム回数は 2 であり, 初期 IS の影響 (1 と仮定) が大きく残留するので, ここでは, $m=10$, $p=1$ のパラメータ設定とした. 本論冒頭にも述べたが, 初期 IS の影響が小さい状況では, RS における IS は対戦相手の協調履歴 (記憶長 1) が (確率 q の確度で) 供示されるわけだから, 単なる表象が認知出来るだけのタグ・システムに較べると有意な情報が示される枠組みと考えられる

$q=1$ の 5 試行アンサンブル平均の結果を図 3(C)同様, コントロールとの利得差で表したのが図 4(B)である. 図 4(A)は図 3(C)と同様に表した $m=10$ のタグ・システムの結果である.

図 4(A)と(B)とを比較すると $\theta=90$ 前後の PD を中心としたエリア領域では, RS の協調サポート効果が広域にわたって顕れており, タグ・システムのそれ

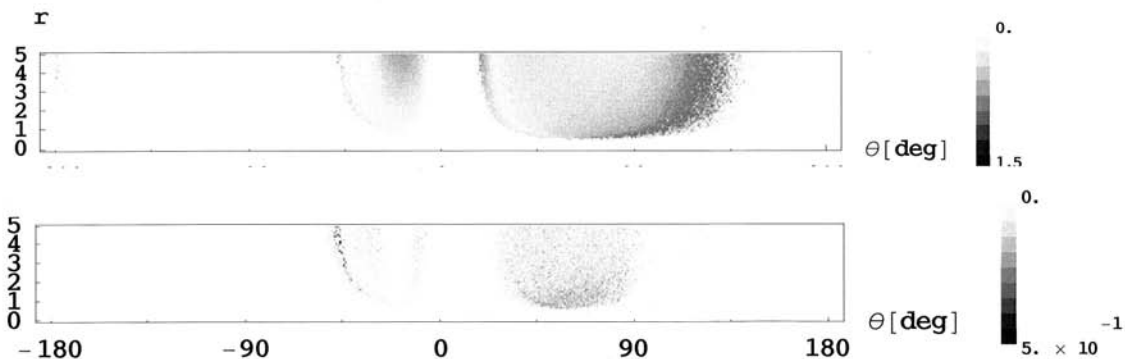


図6 (A) 2Dタグ・システムによる2x2ゲーム利得とコントロールとの差異. (B)2Dタグ・システムと1Dタグ・システムとの利得差.

Fig.6 (A)Holistic pictures covering 2x2 game world for payoff difference between 2D Tag system and Control case. (B) payoff difference of 2D Tag system and usual (1D) Tag system.

を凌駕していることが分かる。この領域において、相手の対戦履歴が情報として直接開示される RS では、単なる表徴しか示されないタグ・システムに較べると互恵的協調（すなわち R を互いに取る）関係はより頑強に構築される。

タグ・システムではコントロールに比較してより高い利得を挙げ得ていた Chicken 型のジレンマが生じる領域、すなわち、図 3(C)で云うと $\theta=45\sim 0\text{deg}$ の領域では、RS はコントロールより高利得を上げることは出来ない。実際、このゲーム領域では、 $Str=2$ (AIID) と $Str=0$ (AIIC) のエージェントだけが生き残り、コントロールの場合と同じ均衡に落ち着く。逆に、 $\theta=45\text{deg}$ より Trivial 側では、RS はタグ・システムと異なりコントロールより高利得を上げている。この理由については以下のように推論される。タグ・システムも RS も if 文で標記される戦略は、“相手が C (D) 出すと思われる場合は自分も C (D) 出す”、すなわち利得行列で云うと対角成分をなす R と P を取ることに暗に前提にされている。S 若しくは T が生起することは戦略からすると想定外の帰結といえる。図 5 はタグ・システムと RS における S (or T) 生起確率をゲーム空間全域で描いた結果である。 $\theta=45\sim 0\text{deg}$ の領域では、タグ・システムは RS より S (or T) の生起確率が高いことが確認出来る。2 記憶長無限繰り返しゲームにおいては、この領域で解析解が規定する内部均衡点より偏って S と T が発生する S・T 互恵が創発することが知られている¹⁴⁾。このことから、タグ・システムでは付与される情報が表象に過ぎないとの曖昧さが、結果的に戦略の柔軟性を生み、高頻な S (or T) の生起に繋がっているものと考えられる。

3.4. 認知タグのスイッチング

$\theta=90\text{deg}$ 前後の PD において、mimic に対する脆弱性が利いて 1 記憶長 RS より協調的互恵サポート効果が低劣になるタグ・システムではあるが、改善の余地はないのだろうか？

ここでは複数のタグを切り替えるメカニズムを検討してみる。

エージェントは複数のタグ（例えば、鶏冠の形、羽の色、尾の長さ etc）を認知出来るとする。タグ種を k とする。エージェント i が k 種のうちタグ・システムの入力として認知しているタグ種をチャンネル $l(i)$ と云うことにする。エージェント i 自身のタグは $Tag_{i,l(i)}$ 、エージェント i が認知するエージェント j のタグは $Tag_{j,l(i)}$ で表される。エージェント i がエージェント j と対戦するとき、 $|Tag_{i,l(i)} - Tag_{j,l(i)}| < Tor_{j,l(i)}$ を満たすときだけ C を出す。ただし、相手 C に対して相手 D の場合（相手に貪られて S となる）には、エージェント i は自らのチャンネルを切り替えるとする。各エージェントは、突然変異の扱いを含め、既述のタグ・システム同様、 Tag_i と Tor_i を適応的に進化させる。

$k=2$ （以下、2D タグ・システム）とした場合の 5 試行アンサンブル平均を図 5 同様コントロールとの利得差で表して結果を図 6(A)に、図 4(A)の先述のタグ・システムとの利得差を図 6(B)に示す。ただし、 $m=1$ である。定性的教示情報量が増えたことにより、2D タグ・システムは、通常のタグ・システムに較べ

高い利得を挙げうる。特に $\theta=30\sim 90\text{deg}$ の Chicken 型ジレンマが生じる領域では、通常のタグ・システムでは協調サポート効果が貧弱であったけれど、2D タグ・システムにより性能が向上している。

4. 結論

Riolo ら¹⁰⁾のモデルをベースにした連続な実数値 Tag と Tor をもつタグ・システムの協調サポート効果を検討した。

- (1) 戦略空間の対称性の観点から、タグ・システムの戦略定義は “if $|Tag_{focal} - Tag_{opp}| < Tor_{focal}$ then C” とすべきである。Riolo ら¹⁰⁾のモデルは、AIID の存在しない Green Beard Effect を前提にしたタグ・システムであり、上記のモデルより高い協調率が達成される。
- (2) PD から SH の領域にかけてタグ・システムによる協調サポート効果は発揮されるが、PD から Chicken 側のゲーム構造に対してはやや弱力となる。この領域には、IS={0,1} の Reputation System の方が有効に機能する。しかし、Hero の領域では、RS は解析解に比し高頻な S・T 互恵を現出させて高利得を上げることは出来ないのに対して、タグ・システムでは高利得が達成される。これは、Tag による情報教示が IS と異なって単に表象に過ぎないことが副次的に効果を発揮するからである。
- (3) Tag を 2 チャンネル有し、ゲームで相手に貪られたときにチャンネル切り替えを行う 2D タグ・システムは通常のタグシステムに較べて高い協調サポート効果を示す。

参考文献

- 1) 例えば、Hamilton, W.D.; The evolution of altruistic behavior, Am. Nat. 97, 354-356 (1963).
- 2) 例えば、Trivers, R.; The evolution of reciprocal altruism, Q. Rev. Biol. 46, 35-57 (1971).
- 3) Axelrod, R.; The Evolution of Cooperation, New York: Basic book (1984).
- 4) 例えば、Nowak, M.A., Bonhoeffer, S., May, R.M.; Spatial games and the maintenance of cooperation, Proc. National Academy Science USA Vol. 91, 4877-4881 (1994).
- 5) 例えば、Tomochi, M.; Defectors' niches: prisoner's dilemma game on disordered networks, Social Networks 26, 309-321 (2004).
- 6) Dawkins, R., The Selfish gene, Oxford University Press, Oxford, (1989).
- 7) Nowak, M.A., Sigmund, K., Evolution of indirect reciprocity by image scoring, Nature 393, 573-577, (1998).
- 8) Nakamaru, M., Kawata, M., Evolution of rumours that discriminate lying defectors, Evolutionary Ecology Research 6, 261-283, (2006).
- 9) Ballen, M. van, Jansen, A., Common language or tower of Babel? On the evolutionary dynamics of signals and their meanings, Proc. Royal Society B 270, 69-76, (2003).
- 10) Riolo, R., Cohen, M.D., Axelrod, R., Evolution of cooperation without reciprocity, Nature 414, 441-443, (2001).
- 11) Roberts, G., Sherratt, T.N., Does similarity breed cooperation?, Nature 418, 499-500, (2002).
- 12) MacDonald, A., Sen, S., The success and failure of tag-mediated evolution of cooperation, Lecture Note in Computer Science 3893, 155-164, (2006).
- 13) Alkemade, F., Bagt, van D.D.B., La Poutre, J.A., Stabilization of tag-mediated interaction by sexual reproduction in an evolutionary agent system, Information Science 170, 101-119, (2005).
- 14) Tanimoto, J., Sagara, H., Relationship between dilemma occurrence and the existence of a weakly dominant strategy in a two-player symmetric game, BioSystems, -, (2006).
- 15) Crowley, P.; Dangerous games and the emergence of social structure: evolving memory-based strategies for the generalized hawk-dove game, Behavioral Ecology 12 (6), 753-760, (2001).
- 16) 相良博喜, 谷本潤; 2 記憶長 2x2 ジレンマゲームにみる“やらせ”に関する考察, 電子情報通信学会技術研究報告 104(727), 1-8, (2005).