

# 拡張マイノリティゲームにおける役割の分化と切替えダイナミクスの検討

西本 恵太<sup>1,a)</sup> イヴァン タネヴ<sup>2</sup> 下原 勝憲<sup>2</sup> 鈴木 麗壘<sup>1</sup> 有田 隆也<sup>1</sup>

受付日 2012年11月8日, 再受付日 2013年1月2日,  
採録日 2013年6月21日

**概要:** マイノリティゲームは複数個体による資源競争のモデルであり, ルールは単純でありながら創発的特徴を持つことで知られる. 本研究ではゲーム選択に至る動的な調整過程に焦点をあてるため, 選択肢を実数値化したうえで意思決定前のコミュニケーションを導入した. 我々は, 調整過程において他個体の戦略の変化に対して自らの戦略を素早く適切に変化させる能力をモデルにおける社会的知能の典型的な表れと考え, これを「社会応答性」と定義した. 社会応答性の進化ダイナミクスを分析することを目的として, エージェントに搭載したニューラルネットワークを進化させる実験を行った結果, エージェント間に役割分化が発生することが示された. 役割分化は, 1つの遺伝子プールの社会応答性が他のプールよりも高く進化した際, 遺伝子プール間にも発生する. 詳細な検討により, 一方のプールが社会応答性を減少させ, 他方の社会応答性の高いプールがそれに合わせる形で役割が動的に切り替わるというメカニズムを明らかにした.

**キーワード:** マイノリティゲーム, 社会的知能, 進化ダイナミクス, 役割の創発

## Role Differentiation and Switch Dynamics in an Extended Minority Game

KEITA NISHIMOTO<sup>1,a)</sup> IVAN TANEV<sup>2</sup> KATSUNORI SHIMOHARA<sup>2</sup> REIJI SUZUKI<sup>1</sup>  
TAKAYA ARITA<sup>1</sup>

Received: November 8, 2012, Revised: January 2, 2013,  
Accepted: June 21, 2013

**Abstract:** The Minority Game (MG) is an  $N$  (odd) player game that represents the collective behavior of adaptive agents in an idealized situation where they have to compete for some finite resource. The Minority Game has been studied actively in various fields because of its simplicity and emergent characteristics. We introduced pre-play communication into the model to focus on the dynamic adjustment processes of agents. Adopting sensitivity to other agents' behavior during communication stage as a measure of social intelligence, we conducted evolutionary simulations using neural network controlled agents and analyzed the evolutionary dynamics. We found that role differentiation occurred at agent level and gene pool level when the sensitivity in one pool evolved to a higher value than the other pools. In an in-depth analysis, we discovered that the role switch results from a genetic change in one pool, leading to a decrease in sensitivity, and adaptation thereto by the other sensitive pool.

**Keywords:** minority game, social intelligence, evolutionary dynamics, emergence of role differentiation

### 1. はじめに

マイノリティゲームは, El farol bar 問題 [2] から着想を得た Challet らによって考案された, 複数の利己的個体が限られた資源を巡って競争する状況を表現したゲームモデルである [6]. このゲームのルールは  $N$  体の個体が独立して 2 択の選択肢から 1 つを選ぶ意思決定を行い, 集団

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science, Nagoya University,  
Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

<sup>2</sup> 同志社大学理工学部  
Faculty of Science and Engineering, Doshisha University,  
Kyotanabe, Kyoto 610-0321, Japan

a) nishimoto@alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp

の中で少数派の選択をした個体が報酬を得るというものである。よって、少数派の選択を選ぶエージェントの数が閾値である半数を超えた瞬間、勝者が敗者に非連続的に切り替わる。マイノリティゲームの特徴は、現在少数派である選択肢を他のエージェントがまねても必ずしも次のゲームで得をするわけではないということである。きわめて単純なルールであるにもかかわらず、エージェント間での協調行動の発生をはじめとした創発的特徴を持つことが示されており、その特性は様々な分野で応用されている [3], [4], [5], [11], [12], [14].

それらの研究では、エージェントが過去の履歴に基づいて意思決定を行うモデルが主に対象とされてきた。特に、参考にする履歴長を変更することによって相転移現象が発生することがよく知られている [5], [14]. しかし現実の資源競争では、個体は必ずしも過去の情報のみに基づいて意思決定をしているわけではなく、個体間で互いの様子を観察し、コミュニケーションをとりながら意思決定をする状況も多く考えられる。また、動物は最終的な攻撃行動を起こす前にお互いに威嚇信号を送ることで知られるが [16], これも意思決定前コミュニケーションの1つの形態と考えることができるであろう。本研究ではモデルの拡張により、ここに焦点を合わせる。

マイノリティゲームにおいて、意思決定前のコミュニケーション（プリプレイ・コミュニケーション）を導入したモデルとしては、Anghelら [1] のモデルがある。このモデルでは、エージェント間がランダムネットワークで結ばれ、各エージェントはリンクを通じて情報交換を行うことができる。毎ターン開始時、全エージェントは通常モデルと同じく過去履歴に基づいて意思決定を行い、その後リンクを通じて相互の意思決定の結果を交換する。エージェントは、リンクを通じてつながっている近隣個体のうち、これまでのゲームで最も高い予測精度を持つ個体の予測結果を自らの意思決定とする。つまり、情報交換をするネットワーク上に、予測結果の模倣のためのネットワークが立ち上がることとなる。シミュレーションの結果、模倣ネットワークがスケールフリー性を持つことが明らかになっており、集団におけるリーダーシップ構造との関連について議論が行われている。彼らのモデルでは各エージェントが交換するのは二値の予測結果であり、動的なコミュニケーションとはいえない。また、そのコミュニケーションもリンクにつながれた個体間で行われる局所的なものである。これに対して我々は、全エージェントが最終決定を行う前に互いの意思を観察しあいながら、自らの意思を動的に調整できる「コミュニケーション期間」を導入する。

現実にもみられるような個体間の複雑な相互作用を表現するため、コミュニケーション期間導入に際して各エージェントの意思表現および利得を連続値化する。意思表現の連続値化は、現実でしばしばみられる中間的な意思の表現を

可能にする点でも意義があると考えられる。Cavagnaら [4] はマイノリティゲームによって経済市場を正確に表現するため、エージェントの意思決定を入札値  $a$  (連続値) で表し、各エージェントの入札値の総和がゲームの結果となるようにモデルを拡張した。彼らのモデルでは、ゲームの結果が各エージェントの入札値によって連続的に変化し、エージェントは入札値に応じた影響を受ける。彼らは意思決定の連続値化だけでなく、エージェントが使用する戦略テーブルの選択に関しても「温度」による確率的影響を考慮した拡張を行い、この拡張モデルがオリジナルのモデルと変わらぬ創発的特徴を持つことを明らかにした。

我々はCavagnaらのモデルと同じく、エージェントが戦略値  $a$  ( $\in [-1, 1]$ ) によって意思を表現し、その値に応じてエージェントの利得が変化するような拡張を行う。ただし、経済市場のモデル化を目的としたCavagnaらのモデルとは若干異なる、よりオリジナルに近い構造を維持した拡張を行った。詳しくは「インタラクティブ・マイノリティゲーム (IMG)」の章で述べる。

Dunbarは社会脳仮説 [8] によって知能進化における社会的相互作用の重要性を提起したが、本研究では連続的なコミュニケーション期間を導入することでエージェント間の相互作用の表現を可能にした。この期間において、各エージェントには他エージェントの戦略値を観察しながら自らの戦略値を適切に調整するための能力、つまり他者行動に対する応答の適応性が求められる。我々はこれを「社会応答性」と定義する。コミュニケーション期間は人の社会的相互作用を表現し、社会応答性は人の持つ社会的知能に対応する概念であると考えられる。拡張モデルにおける利得を適応度としてエージェントのニューラルネットワークを進化させることで、社会応答性の進化ダイナミクスに関して分析を行う。ゲーム理論におけるエージェントシミュレーションを通して、知能進化や学習のダイナミクスの分析を行う研究がこれまでもいくつかなされているが [13], [18], 本研究はそのうちの1つに位置づけられる。

## 2. インタラクティブ・マイノリティゲーム (IMG)

Challetら [6] によって提案された元々のマイノリティゲームでは  $N$  体 ( $N$  は奇数) のエージェントが存在し、エージェント  $i$  の選択肢を  $A_i$  とすると、その利得  $payoff$  は次のように定義される。

$$payoff = -A_i \operatorname{sgn} \left( \sum_{k=1}^N A_k \right), \quad (1)$$

$$(A_i \in \{-1, 1\}, payoff \in \{-1, 1\}),$$

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0, \\ 0 & \text{if } x = 0, \\ -1 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

我々はこのモデルに2つの拡張を加える．まず第1に，エージェントの選択および利得を連続値化する．エージェントは二値ではなく戦略値  $a_i$  によって意思を表現し，利得は次のように計算される．

$$payoff = -a_i \operatorname{sgn}\left(\sum_{k=1}^N \operatorname{sgn}(a_k)\right), \quad (2)$$

$$(a_i \in [-1, 1], payoff \in [-1, 1]).$$

戦略値  $a_i$  の正負が元のモデルにおける二択の選択に対応し，戦略値の符号が集団の中で少数派であるものがゲームの勝者となる．さらに，戦略値の絶対値は選択の意思の強さを表す．戦略値の絶対値が大きいほど，ゲームに勝った場合に多くの報酬を得るが，負けたときに失う損害も大きい．この拡張により，従来では表現できなかったエージェントの微妙な意思表現が可能になった．

前述した Cavagna らの拡張は，式 (1) から閾値関数  $\operatorname{sgn}$  を取り除くことでマイノリティゲームを連続化した．これに対し我々は，閾値関数を残すことで「ある選択肢を選ぶエージェント数が半数を超えた場合に勝者と敗者に切り替わる」という元々のマイノリティゲームの持つ非連続的構造を維持した拡張を行った．

第2に，エージェントが最終的な意思決定をする前にコミュニケーションする期間を設けた．一定期間（ステップ  $t = 0, 1, \dots, T$ ），各個体はお互いの戦略値を観察しながら，自らの戦略値を連続的に更新する．ステップ  $t$  におけるエージェント  $i$  の戦略値は  $a_i(t)$  で表現され，各エージェントはステップ  $t-1$  における他エージェントの戦略値と自らの戦略値を参考にして微小な変化量  $\epsilon(t)$  ( $-\gamma \leq \epsilon(t) \leq \gamma$ ) でこれを変化させる．この制限は，エージェントが戦略値  $a_i(t)$  を1ステップに大きく変化させることを不可能にするものである．これは，現実のコミュニケーションにおいて行動や態度が過去の文脈にある程度拘束されることを表現する．本研究では  $\gamma = 0.01$  に設定した．ただし  $a_i(t) + \epsilon(t) > 1$  のときは  $a_i(t+1) = 1$ ， $a_i(t) + \epsilon(t) < -1$  のときは  $a_i(t+1) = -1$  とする．コミュニケーション期間が終了した時点での戦略値  $a_i(T)$  を自らの最終的な意思決定とし，エージェントは式 (2) で定められた利得を得る．

図1はゲームの一例を表す．x軸はステップ  $t$  を表し，y

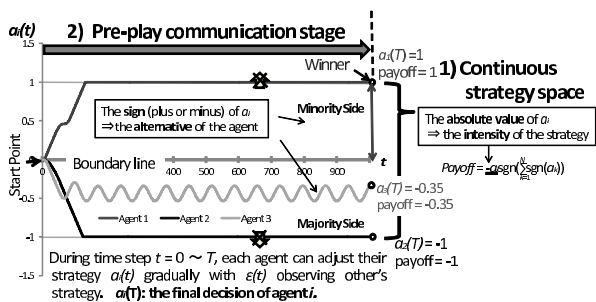


図1 ゲームの例 (3 エージェント)

Fig. 1 A trial of IMG ( $N = 3, T = 1000$ ).

軸は各エージェントの戦略値  $a_i(t)$  を表す．

これらの拡張により，エージェントの動的な相互作用の過程を表現できるようになった．

### 3. モデル

#### 3.1 エージェントの構成

本研究では基本的分析として，マイノリティゲームにおける最少人数である  $N = 3$  の場合に焦点を当て，全個体が相互にコミュニケーションを行うことのできる状況を想定する．各エージェントは，コミュニケーション期間中の各ステップの変化量  $\epsilon(t)$  を更新するために3層リカレントニューラルネットワーク（入力層5，中間層6，出力層4）で構成される．出力層のうち2ユニットは入力層の2ユニットに再帰的に接続されている．単純化のため，バイアスニューロンは導入しない（バイアスニューロンを導入した場合，ゲームにおけるエージェントの挙動には変化があるもののシミュレーション全体の結果にはほとんど影響がないことを確認している）．伝達関数としてはシグモイド関数 ( $f(x) = 1/(1 + \exp(-x))$ ) を用いる．リカレントニューラルネットワークは内部記憶を持つことができ，現在の入力だけでなく過去の入力によって違う出力をすることができる．

毎ステップ，エージェントのリカレントニューラルネットワークはそのエージェントの戦略値，他の2体の戦略値との差，2つの出力ユニットから再帰的に入力される値，この5つの値を入力として受け取り，出力層の2つのユニットから値  $a_u, a_d$  を出力する．変化量  $\epsilon$  が戦略値変化の速度を表すのに対し， $a_u, a_d$  は戦略値変化の上向き，下向きの加速度を表す．変化量  $\epsilon$  は  $\epsilon(t+1) = \epsilon(t) + (a_u - a_d)/100$  として更新される．ただし， $\epsilon(t) + (a_u - a_d)/100 > \gamma$  のときは  $\epsilon(t+1) = \gamma$ ， $\epsilon(t) + (a_u - a_d)/100 < -\gamma$  のときは  $\epsilon(t+1) = -\gamma$  とする．

#### 3.2 進化のアルゴリズム

各エージェントのリカレントニューラルネットワークにおける54の結合重みを遺伝型として，単純化した進化戦略 (Evolution Strategy) によってこれを進化させる．我々は3体のエージェントを独立して進化させるために3つの遺伝子プールを用意する．

##### (1) 初期集団の生成

各遺伝子プールに  $n_p$  体の初期個体を生成する．初期個体の各遺伝子型の値は一様乱数  $U$  によって決定する．

##### (2) 対戦と適応度評価

各遺伝子プールからランダムに1個体を取り出し，3体からなる対戦グループを作る．この操作を個体が重複しないよう  $n_p$  回繰り返し，各遺伝子プールからランダムに選ばれた3個体によって構成される  $n_p$  個の対戦グループを作る．各対戦グループ内の3体で IMG

を行う。対戦が終わると、すべての個体は元の遺伝子プールに戻される。このグループ生成から対戦までの操作を  $R$  回繰り返す（各個体がランダムな相手と  $R$  回対戦を行うようにする）。各個体の適応度は、 $R$  回の対戦による利得の累積と定義する。

(3) 次世代の生成

次の操作は各遺伝子プールにおいて独立して行う。まず、遺伝子プールにおいて最も適応度の高い  $n_e$  個体をエリートとして保存する\*1。次に、エリート個体の全遺伝子座に正規乱数  $N_R$  を加えることにより各エリート個体から 2 体、計  $2n_e$  体の子を生成する。最後に一様乱数  $U$  によって初期化されたランダム個体を  $n_p - 3n_e$  体生成し、次世代集団に加える。

3.3 社会応答性

社会的相互作用には、他個体が行った行動によって自らの利益が左右される「相互依存的状況」が多く含まれる [17]。相互依存的状況においては、他個体の行動変化に素早く反応し、自らの行動を適応的に変化させる能力が重要な役割を演じると考えられる。この能力を「社会応答性」と定義し、進化の過程でどのように変化していくか調べる。本研究では、コミュニケーション期間において各個体が戦略値を変化させる挙動を観察することにより、個体の社会応答性を評価する。

3 人版 IMG のコミュニケーション期間において、あるステップにおける 2 体のエージェントの戦略値が決まれば、そのステップにおいてコミュニケーション期間が終了すると仮定した際に残りの 1 体の利得を最大にする戦略値は、 $-1, 1, 0$  のうちどれか 1 つに定まる。たとえば 2 体のエージェントの戦略値の符号が両方正の場合、残りの 1 体の最適戦略値は  $-1$  である。逆に、2 体の戦略値の符号が正負異なる場合、残りの 1 体の最適戦略値は  $0$  である。ある個体がコミュニケーション期間において、自らの戦略値を他の 2 体によって定まる最適に近い値で変化させるならば、その個体は他の 2 体の戦略値を観察して自らの行動を調整していると考えられ、社会応答性が高いと解釈できる。

我々は単純化のため、エージェントのとりうる戦略値の領域  $[-1, 1]$  を  $[-1, -0.33]$ ,  $[-0.33, 0.33]$ ,  $[0.33, 1]$  の 3 つの領域に分ける。それぞれの領域は最適戦略値  $-1, 1, 0$  に対応する最適領域である。そして、社会応答性を測るための固定環境として、あらかじめ決まった挙動をとるテスト用のエージェントを 2 体用意する。その 2 体とのゲームにおけるコミュニケーション期間中、対象のエージェントの戦略値が最適領域内に存在したステップ数をカウント

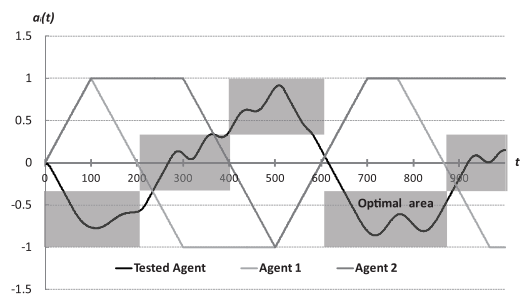


図 2 固定環境における社会応答性 0.9 の個体の行動（灰色の領域は各ステップにおける最適領域を表す）

Fig. 2 Behavior of the individual with social sensitivity 0.9 in a static environment (The gray areas indicate the optimal area at each step).

し、コミュニケーション期間中 1000 ステップ内に占める割合を求める。いくつか用意した固定環境での平均を対象個体の社会応答性とする。おおまかな指標としては、まったく他の個体の戦略値に影響されない個体の社会応答性は 0.3 付近、1 体のみを観察して戦略値を調整する個体の社会応答性は 0.5 付近、他の 2 体の戦略値に基づいて適切な戦略値調整ができる個体の社会応答性は 0.8 付近の値をとる。図 2 における黒線は進化シミュレーション中で生まれた社会応答性 0.9 の個体の固定環境における挙動を表している。灰色の線は我々の用意したテスト用のエージェント 2 体の挙動であり、灰色の領域は各ステップにおける最適領域を示す。対象の個体は他のエージェントの戦略値の変更に対して適切に自らの戦略値を調節している様子が確認できる。

4. 実験結果と解析

4.1 エージェント間の相互作用の進化

3.2 節にあげた方法によって 3 体のエージェントのリカレントニューラルネットワークの重みを 10000 世代進化させた。コミュニケーション期間の終了時刻  $T = 1000$ 、各遺伝子プール内の遺伝子数  $n_p = 40$ 、エリート保存する遺伝子数  $n_e = 12$ 、各個体の 1 世代におけるゲーム数  $R = 40$ 、ランダムな遺伝子を生成する際に用いる一様乱数  $U$  の範囲  $[-1, 1]$ 、遺伝子座に加える正規乱数  $N_R(0, 0.2^2)$  の設定を用いる。このパラメータをいくつか変えて実験を行ったが、以下に示す結果に大きな差は見られなかった。ただし、正規乱数  $N_R$  の標準偏差、およびランダム個体の数を小さくすると系全体の変化が少なくなるのが観察された。これに関しては後述する。

まず、社会応答性の進化とともに 3 体のエージェントの挙動がどのように進化していったかを分析するため、進化の初期段階に注目する。図 3 は、0 世代～99 世代における各遺伝子プールの平均適応度と全個体の平均適応度の変化である。全遺伝子プールの個体の適応度が急激に増加しているのが分かる。初期集団では  $-20$  程度であった適応度

\*1 社会応答性を持つような比較的高度な情報処理能力を持つニューラルネットワークを進化させるためには高適応度個体を保護する必要があると考え、エリート保存手法を採用した。ルーレット選択方式を選択した場合でも、社会応答性の進化が停滞する傾向があるものの、本研究の主要な結果に関しては同様の結果を得た。

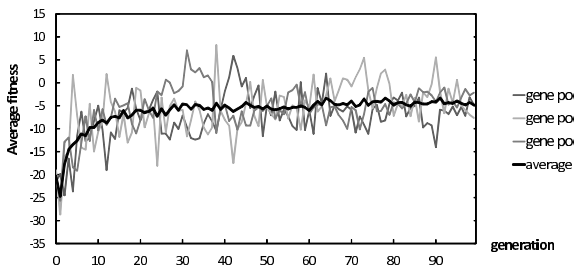


図 3 平均適応度の変化

Fig. 3 Evolution of the average fitness.

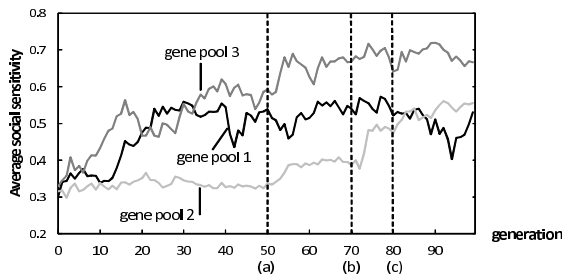


図 4 各遺伝子プールの社会応答性の進化

Fig. 4 Evolution of the social sensitivity in each gene pool.

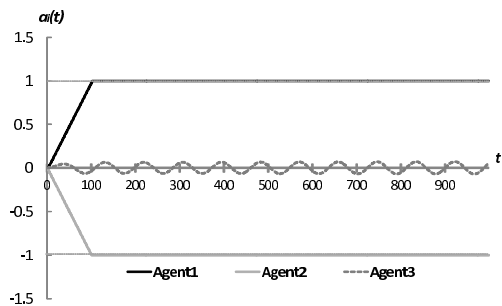


図 5 50 世代におけるエージェントの挙動

Fig. 5 Behavior of agents at the 50th generation.

は 99 世代の時点で  $-5$  まで増加しており、この後の世代も  $0$  と  $-5$  の間を推移する。

図 4 は、図 3 と同じ実験での社会応答性の進化を表している。社会応答性の緩やかな増加が確認できるが、遺伝子プールごとにその進化には大きな差があることが分かる。

図 5 に 50 世代目に見られたエージェントの戦略値調整の軌跡の一例を示す。2 体のエージェントが最終的に  $1$  と  $-1$  の戦略値をとり、残りの 1 体が  $0$  付近の戦略値をとるこのような状況はシミュレーション中に多く見られた。2 体はお互いに同符号をとることを避けた結果  $1$  と  $-1$  の戦略値をとっているが、残りの 1 体は戦略値をどこにとっても多数派となり利得は  $0$  未満となる。そのため境界である  $0$  付近に戦略値をとることによって損害を抑えることが、残りの 1 体にとって最適な行動ということになる。これはハイリスク・ハイリターンな戦略をとる 2 体とローリスク・ローリターンな戦略をとる 1 体間の戦略分化と考えることができる。

この状況において特徴的なのは、敗者になる  $0$  付近に

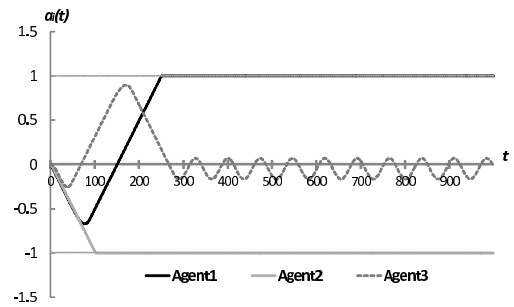


図 6 70 世代におけるエージェントの挙動

Fig. 6 Behavior of agents at the 70th generation.

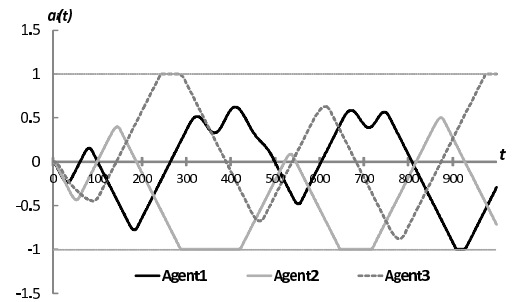


図 7 80 世代におけるエージェントの挙動

Fig. 7 Behavior of agents at the 80th generation.

戦略値をとる 1 体がゲームの勝者を決定することである。我々は、 $0$  付近の戦略値をとり、ゲームの勝敗を決める個体を「キーエージェント」、 $a_i = 1, -1$  のハイリスク・ハイリターンな戦略値をとっている個体を「リスクテイカ」と定義し、これを一種の「役割」ととらえる。個体間で役割分化がおこると、3 体ともが同符号の戦略値をとったり、2 体が同符号かつ絶対値の大きい戦略値をとることで双方大きな損害をうけるといった状況を避けることができる。図 3 から、 $0$  世代～ $20$  世代で平均適応度の増加がみられるが、これは役割分化の発生が原因であると考えられる。

70 世代あたりになると、遺伝子プール 1 (エージェント 1) と遺伝子プール 3 (エージェント 3) の平均社会応答性が高い値に達しているのが分かる (図 4(b))。図 6 は、エージェント 1 とエージェント 3 が他者の戦略値を観察しながら自らの戦略値を調整していることを示唆する 70 世代における戦略値の軌跡である。同図では、3 体のエージェントはまず負の方向に戦略値を移動し始めるが、このまま全員の戦略値が負のままだと全員の利得が  $0$  以下になってしまうので、エージェント 3 がステップ 40 付近で、エージェント 1 がステップ 100 付近で正方向に方向転換を行っている。さらにエージェント 3 は、エージェント 1 の戦略値が  $0$  を超えた直後のステップ 170 付近で再び負の方向へ転換し、 $0$  付近を推移させている。最終的に図 5 のようなエージェントごとの戦略値が 3 つに分化した状態でコミュニケーション期間が終了している。エージェント 1, 3 の挙動は、他の個体の戦略値の変化に応じて自らの戦略値を移動させる方向を切り替えたと解釈できる。実際このゲー

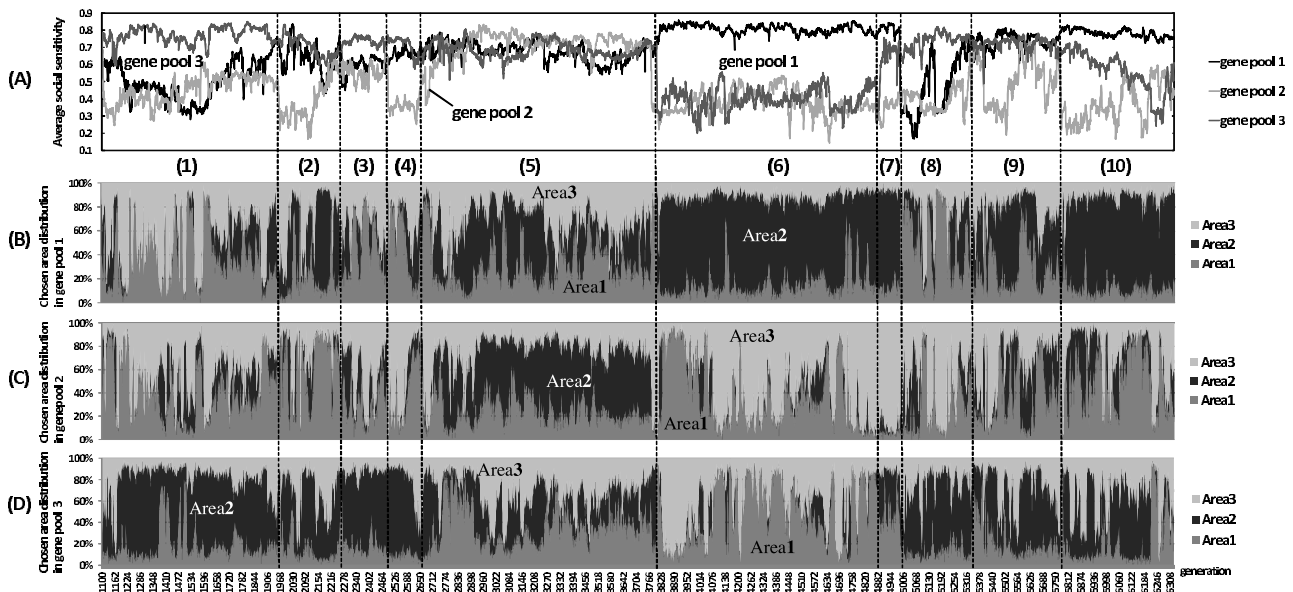


図 8 (A) 1100~6330 世代の各遺伝子プールの平均社会応答性, (B)~(D) 1100~6330 世代の各遺伝子プールの個体を選んだ戦略値領域の傾向

Fig. 8 (A) Average social sensitivity of each gene pool in 1100th ~ 6330th generation, (B) ~ (D) Chosen area distribution in each gene pool in 1100th ~ 6330th generation.

ムのエージェント 1 と 3 の社会応答性は 0.53 と 0.76 と比較的高かった。

図 7 は 80 世代におけるゲームの様子を示す。3 エージェントが相互作用しながら戦略値が振動している様子が観察できる。80 世代では全遺伝子プールの社会応答性が比較的高い値に到達しており (図 4(c)), 3 体の社会応答性はそれぞれ 0.61, 0.54, 0.59 である。全エージェントの社会応答性が高まった結果, このような振動が見られたのではないかと考えられる。

#### 4.2 社会応答性の進化

前節では, 進化の初期段階における社会応答性の進化と, エージェントの特徴的な挙動に関して分析を行った。社会応答性はつねに増加するわけではなく, 進化の過程で増加と減少を繰り返す複雑な進化ダイナミクスを持っていることが分かっており, 本節ではそのダイナミクスに着目する。図 8(A) は, 進化実験における 1100~6330 世代の各遺伝子プールにおける個体の社会応答性の平均の推移である。必ずしもすべての遺伝子プールが高い社会応答性を獲得するわけではなく, しばしば遺伝子プール間で社会応答性に大きな差があることが分かる。さらに, 社会応答性の推移は大まかに 3 つのフェーズに分けることができる。

- フェーズ 1: 1 つの遺伝子プールが残りの 2 つのプールよりも高い社会応答性を獲得しているフェーズ (図 8(1), (3), (6), (8), (10))。
- フェーズ 2: 2 つの遺伝子プールが同程度に高い社会応答性を獲得し, 残りの 1 つのプールがそれよりも低

く位置しているフェーズ (図 8(2), (4), (7), (9))。

- フェーズ 3: すべての遺伝子プールが同程度の高い社会応答性を持っているフェーズ (図 8(5))。

これらのフェーズが切り替わりながら, 世代が進行しているのが確認できる。なお遺伝子に加える正規乱数  $N_R$  の標準偏差, もしくは進化操作時にランダムに加える個体の数を少なくした場合, フェーズ 1 の期間が延びフェーズ 2, 3 の期間が小さくなる傾向が観察された。また, これらのフェーズの切り替わり自体も少なくなる傾向にあった。遺伝子プール間の社会応答性の差と遺伝子プールの担う役割との関係に関しては 4.4 節で論ずる。

#### 4.3 遺伝子プール間での役割分化

次に, 進化の過程で各遺伝子プールごとにエージェントのとりうる戦略値に傾向が発生していないかを調べる。エージェントのとりうる最終的な戦略値 ( $a_i(T)$ ) の領域  $[-1, 1]$  を三分割しそれぞれ領域 1~3 (領域 1:  $[-1, -0.33]$ , 領域 2:  $[-0.33, 0.33]$ , 領域 3:  $[0.33, 1]$ ) と定義する。領域 1, 3 はリスクテイカの戦略値に対応しており, 領域 2 はキーエージェントの戦略値に対応している。図 8(B), (C), (D) は 1100 世代~6330 世代までの各世代において行われる全ゲーム中, 各遺伝子プールの個体を選んだ戦略値領域の傾向を表している。この図から, しばしば遺伝子プール間に大きな傾向の差が生じていることが分かる。たとえば図 8(6) より, 3840 世代~4850 世代の遺伝子プール 1 の個体は高い確率で領域 2 の戦略値をとっており, それ以外の領域の戦略値をとるのは稀であることが分かる。逆に遺伝

子プール 2 と 3 の個体は領域 1 と 3 の戦略値を選ぶ傾向が強い。

4.1 節においてリスクテイカとキーエージェントの役割分化について説明したが、これは 1 ゲーム内で 3 体のエージェントがそれぞれ異なった領域の戦略値をとることであった。本節で言及する現象は、遺伝子プールごとに個体が異なる領域の戦略値をとる傾向が継続した状態であり、これを遺伝子プール間の役割分化と考える。3840 世代～4850 世代では遺伝子プール 1 がキーエージェントの役割を担い、遺伝子プール 2 と 3 がリスクテイカの役割を担っていることになる。また、役割分化の観点から進化過程を遺伝子プールの役割が「明確に分化しているフェーズ」と「曖昧なフェーズ」の 2 つに分けることができ、それらが交互に現れる様子が観察できる。たとえば図 8 において (1), (3), (6) 等が遺伝子プール間の役割が明確に分化しているフェーズであると考えられる。

#### 4.4 役割と社会応答性の関係

本節では、シミュレーションの中で創発した役割と、社会応答性の関係について分析を行う。我々は 4.2 節で社会応答性の進化過程を 3 つのフェーズに分類したが、フェーズ 1 において、遺伝子プール間の役割分化が最も明確になる傾向があることに着目する (特に図 8(1), (6))。またフェーズ 1 において、最も高い社会応答性を持つ遺伝子プールの個体が領域 2 の戦略値をとる傾向が強く、逆に社会応答性が低いプールの個体は領域 1, 3 の戦略値をとる傾向が強い。それぞれの戦略値領域は各役割に対応しており、この結果から役割と社会応答性の間に相関があることが推測される。

社会応答性と役割の関係に関して定量的な評価を行うため、シミュレーション中の全個体をその個体がとる戦略値の領域の傾向に基づいてタイプ分けし、各タイプの個体の社会応答性の平均をとった (図 9)。この結果より、領域 2 の戦略をとる傾向にある個体は、高い社会応答性を持つことが分かる。つまり、ゲームにおいてキーエージェントの役割を担うことの多い個体はリスクテイカの役割を担う個体よりも高い社会応答性を持つことを示す。

リスクテイカは勝敗がキーエージェントの戦略値によっ

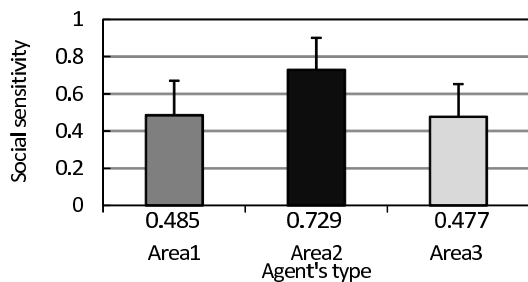


図 9 エージェントのタイプと社会応答性の関係  
Fig. 9 Agent's type and social sensitivity.

て決まり、運が良ければ大きな利得をあげることができる。しかしキーエージェントの役割を担うことの多い個体はゲームでは敗者になることが多く、他の 2 体の挙動に敏感でなければ大きな利得をあげることができない。よってキーエージェントの個体には、リスクテイカを担う傾向が強い個体よりも社会応答性に対する強い淘汰圧がかかり、進化が促進されたと考えられる。遺伝子プールが担う役割によって、プールに属する個体集団全体の社会応答性が変化する様子も多く観察されており、後に論ずる。

#### 4.5 役割分化と切替のメカニズム

進化の過程で遺伝子プール間の役割が動的に切り替わるのが頻繁に観察される。本節では、遺伝子プール間の役割分化、およびその切り替わりにおける社会応答性の役割に関して分析を行う。図 10 (A) は 3767 世代～3880 世代における遺伝子プールごとの平均社会応答性を表している。図 10 (B)～(D) は、各遺伝子プールにおいて個体を選んだ戦略値領域の傾向である。同図において、4.2 節で定義した社会応答性のフェーズが 3 から 2, 2 から 1 へと遷移し

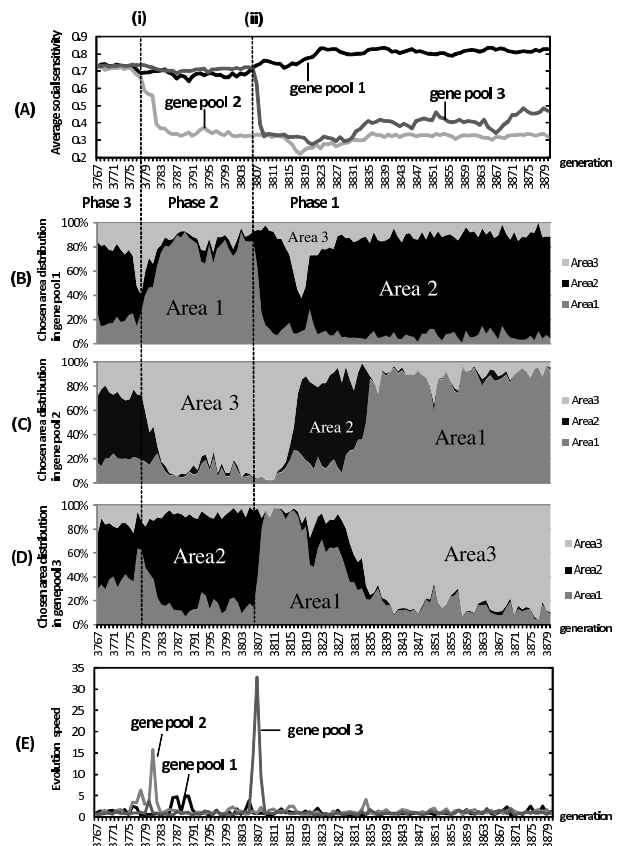


図 10 (A) 各遺伝子プールの平均社会応答性, (B)～(D) 各遺伝子プールの個体を選択した戦略値領域の傾向, (E) 各遺伝子プールの進化速度

Fig. 10 (A) Average social sensitivity of each gene pool, (B)～(D) Chosen area distribution in each gene pool, (E) Evolution speed in each gene pool.

ていく過程が観察できる。

3778 世代～3782 世代 (図 10 (i)) において、あいまいであった遺伝子プール間の役割分化が明確化する様子が見られる。このプロセスは以下のような 3 つの遺伝子プールの相互作用から説明される。

- (1) 遺伝子プール 2 内に社会応答性が低く領域 3 内の戦略値をとる個体が現れる。高リスク高リターンな戦略であるため、その個体が運良く高い適応度を獲得した場合は急速に遺伝子プール内にこの形質が広まる。このことは 3778～3782 世代において、遺伝子プール 2 の平均社会応答性が急激に低下し、領域 3 の戦略値をとる傾向が強まったことから確認される。
- (2) 3778 世代において領域 3 の戦略値をとる傾向にあった (約 60%) 遺伝子プール 1 の個体は、遺伝子プール 2 の個体と同じ領域になるのを避けて自らの戦略値を領域 1 に切り替えている。
- (3) (2) の変化をうけて、領域 1 の戦略値をとる傾向にあった (約 60%) 遺伝子プール 3 の個体は、自らの戦略値を領域 2 に変更している。

遺伝子プール 2 の戦略値傾向の変化を原因として、他の 2 つの遺伝子プールの個体が連鎖的に戦略値領域を変化させた結果、各遺伝子プールの役割が明確になった。ここで注意したいのは、遺伝子プール 2 の変化と他の 2 つの遺伝子プールの変化は異なるメカニズムによって行われているということである。これを示すのが、各世代における進化速度を表した図 10 (E) である\*2。遺伝子プール 2 の遺伝子は 3778 世代～3782 世代までの間で大きな変化をしているにもかかわらず、遺伝子プール 1 と 3 ではほとんど遺伝子的変化は見られない。また図 10 (A) より、遺伝子プール 1 と 3 の平均社会応答性は 3778 世代～3782 世代で 0.7 付近の高い値をとっていることが分かる。これらの結果は、遺伝子レベルの変化によって遺伝子プール 2 の個体がとる戦略値の傾向が変化したのに対し、社会応答性の高い他の 2 プールの個体はその変化に対応する形で遺伝子の変化なしに戦略値を変更したことを示す。

同様のプロセスは 2 遺伝子プール間の役割切替えでもみられる。3806 世代～3809 世代 (図 10 (ii)) を境に、キーエージェントの役割を担っていた遺伝子プール 3 とリスクテイカの役割を担っている遺伝子プール 1 の役割が切り替わっているのが分かる。まず遺伝子プール 3 内で、社会応答性が低く領域 1 の戦略値をとる遺伝子が広がる。これに

対して社会応答性の高い遺伝子プール 1 の個体は戦略値を領域 2 に変更することで対応し、役割を切り替えている。役割が集団間で明確に分化している状況でこれを変更することは、利得を下げかねない行為であり基本的に社会応答性の高い個体は行わない。社会応答性が高いということは、他の個体の行動に基づいて自らの行動を決定することであり、同時に他の個体の行動や役割に自らの行動が拘束されることを意味する。遺伝子プール 3 は社会応答性を減少させることで固定された役割を脱して自らの担う役割を変更し、役割切替えの起点となったと解釈することもできる。

また 3810 世代～3840 世代まで、比較的時間をかけて遺伝子プール 2 と遺伝子プール 3 の役割切替えが行われる。これはリスクテイカの役割を担う 2 プール間の役割切替えである。両プールの社会的応答性の低さが、切替えに時間がかかった原因だと考えられる。最終的には、遺伝子プール 1 が領域 2 (キーエージェント)、遺伝子プール 2 が領域 1 (リスクテイカ)、遺伝子プール 3 が領域 3 (リスクテイカ) と、プールごとの役割が明確に分化した安定状態に収束する。

3806 世代以降、遺伝子プール 1 の個体は主に領域 2 の戦略値をとる傾向を持ち、最終的には 90% 近くが領域 2 の戦略値をとるようになるが、それと同時に遺伝子プール 1 の社会応答性が増加しているのが確認される。つまり、遺伝子プール 1 の個体は、キーエージェントの役割を担っている過程で、社会応答性が増加したことを意味する。これは 4.4 節で説明した、担う役割によってその集団の社会応答性が進化する例である。

## 5. おわりに

本研究では、マイノリティゲームにおいて個体間の動的かつ連続的なコミュニケーションを表現するため、エージェントの選択の連続値化とプリプレイ・コミュニケーションを導入したインタラクティブ・マイノリティゲーム (IMG) を新たに提案した。進化実験の結果、二値による意思表示では現れえない、ハイリスク・ハイリターンな戦略をとる 2 個体とローリスク・ローリターンな戦略をとる 1 個体間の戦略分化が観察された。また導入したコミュニケーション期間では、エージェント間で複雑なコミュニケーションが行われている様子が確認された。

我々は、コミュニケーション期間において他個体の戦略値の変化に対して行動を適応的に変化させる能力を社会応答性と定義した。そして先述した 2 種類の戦略を役割ととらえ、社会応答性との関係を分析してみたところ戦略間で社会応答性に差が存在することが確認され、社会応答性と役割との間に共進化的関係があることが明らかになった。

また役割の分化は個体間だけでなく集団間 (遺伝子プール間) でもしばしば発生することが分かっており、それは

\*2 遺伝子はリカレントニューラルネットワークにおける 54 の結合重みを表しており、54 次元実数値ベクトルと考えることができる。世代  $g$  における上位 12 体 (エリート個体) の平均ベクトルを  $\bar{v}(g)$  とし、進化速度  $E_v(g)$  を以下のように定義する。

$$E_v(g) = |\bar{v}(g) - \bar{v}(g-1)|$$

進化速度  $E_v(g)$  は世代  $g-1$  から世代  $g$  にかけての遺伝子プール内での遺伝子の変化の大きさを表す。



1つの遺伝子プールの個体の社会応答性が他の2プールよりも高く進化した際に起こる傾向がある。集団間の役割切替のメカニズムについて分析したところ、遺伝子レベルの変化を原因とした、社会応答性の減少をとまなう遺伝子プールの役割変化に、社会応答性の高い遺伝子プールの個体が対応する形で行われていることが明らかになった。

次に、人と人との間の社会的相互作用の一側面に焦点を合わせたモデルであるIMGを用いて示された社会応答性、役割分化、切替のメカニズムが現実の現象の中で普遍的に働いている可能性を検討するために、霊長類学や動物行動学等で得られた知見との関連について議論する。

ヒト社会における役割は他の霊長類に比べきわめて豊かつ重要であることが知られている。特に、ヒトは社会的文脈に応じて自らの役割を動的に切り替えることができることが知られている [15]。本研究の結果は、そのような特性の進化的な獲得における社会的応答性（より一般的には社会的知能）と社会的役割の両者の相互作用の重要性を示すものである。

また本研究は、遺伝子プール間で社会応答性に差がある期間（フェーズ1）において遺伝子プール間の役割が最も明確になることを明らかにしたが、これは、社会的役割の固定化がその社会を構成する個体の社会的能力の差を生み出すこと、あるいは逆に、社会的能力の差が役割の固定化、安定化を生み出すことを示唆する。この点に関連して、Harcourtらは2体の魚による採餌行動の実験で、個体間の性格の違いがリーダーとフォロワー間の役割分化に重要な役割を持っていることが明らかにし [9]、さらに、Kingらは個体間の特性の違いは社会的協力を促進するために集団で維持されているという仮説を提唱している [10]。他個体の行動変化に対する応答の適応性を個体の性格としてとらえるならば本研究の結果はこの仮説を強く支持するものといえよう。

本研究では最後に、役割切替は、社会応答性の低い個体に社会応答性の高い個体が対応する形で起こることを示した。これに関連する実験として、Dreaらによるブチハイエナ2体による協調行動の実験がある [7]。彼らは、社会的序列を持つブチハイエナの社会において、協調する2体の序列が協調タスクの解決に与える影響を調べた。その結果、タスクに不慣れた下位個体とタスクに慣れた上位個体のペアの場合、上位個体が社会的役割を切り替え、下位個体に自らの行動を合わせることでタスクを解く行動が観察された。これは、能力の高い個体が低い個体の行動に合わせることで役割を切り替えるという点で本研究の結果と類似している。彼らの用いた協調タスクと拡張マイノリティゲームのゲーム構造は異なるが、普遍的にそのようなメカニズムが働いたことについては、さらなる検討の価値があるものと考えられる。

今後の課題として、ゲームに参加するエージェントの数

$N$ を増やすことが考えられる。役割分化やその切替え等、本研究で示されたメカニズムの一部は  $N$ を増やした場合でも現れると予想されるが、同時にコミュニケーションの局所性やトポロジの影響を考慮する必要があるだろう。たとえば、本研究ではエージェントは他の2体の戦略値を入力として受け取り、意思決定メカニズムであるRNNを進化させているが、どのエージェントの戦略値情報を受け取るかという点に関しても適応メカニズムを導入した、エージェント自体とエージェントの得る情報のネットワークが共進化するモデルを検討中である。

## 参考文献

- [1] Anghel, M., Toroczkai, Z., Bassler, K.E. and Korniss, G.: Competition-Driven Network Dynamics: Emergence of a Scale-Free Leadership Structure and Collective Efficiency, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.92, No.5, 058701 (4 pages) (2004).
- [2] Arthur, W.B.: Inductive Reasoning and Bounded Rationality, *The American Economic Review*, Vol.84, No.2, pp.406-411 (1994).
- [3] Cavagna, A.: Irrelevance of memory in the minority game, *Phys. Rev. E*, Vol.59, No.4, pp.R3783-R3786 (1999).
- [4] Cavagna, A., Garrahan, J.P., Giardinà, I. and Sherrington, D.: Thermal Model for Adaptive Competition in a Market, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.83, No.21, pp.4429-4432 (1999).
- [5] Challet, D. and Marsili, M.: Phase transition and symmetry breaking in the minority game, *Phys. Rev. E*, Vol.60, No.6, pp.R6271-R6274 (1999).
- [6] Challet, D. and Zhang, Y.-C.: Emergence of Cooperation and Organization in an Evolutionary Game, *Physica A*, Vol.246, Issues 3-4, pp.407-418 (1997).
- [7] Drea, C.M. and Carter, A.N.: Cooperative problem solving in a social carnivore, *Animal Behaviour*, Vol.78, pp.967-977 (2009).
- [8] Dunbar, R.I.M.: The Social Brain Hypothesis, *Evolutionary Anthropology*, Vol.6, pp.178-190 (1998).
- [9] Harcourt, J.L., Ang, T.Z. and Sweetman, G.: Social Feedback and the Emergence of Leaders and Followers, *Current Biology*, Vol.19, pp.248-252 (2009).
- [10] King, A.J., Johnson, D.D.P. and Vugt, M.V.: The Origins and Evolution of Leadership, *Current Biology*, Vol.19, pp.R911-R916 (2009).
- [11] Kurihara, S., Fukuda, K., Hirotsu, T., Akaishi, O., Sato, S. and Sugawara, T.: How Collective Intelligence Emerge in Complex Environment?, *Proc. Bio-ADIT 2004*, pp.484-495 (2004).
- [12] Kutsuna, H. and Fujita, S.: A Fair and Efficient Congestion Avoidance Scheme Based on the Minority Game, *Journal of Information Processing Systems*, Vol.7, pp.531-542 (2011).
- [13] McNally, L., Brown, S.P. and Jackson, A.L.: Cooperation and the evolution of intelligence, *Proc. R. Soc. B*, Vol.279, pp.3027-3034 (2012).
- [14] Savit, R., Manuca, R. and Riolo, R.: Adaptive Competition, Market Efficiency, and Phase Transitions, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.82, No.10, pp.2203-2206 (1999).
- [15] Wilson, E.O.: *Sociobiology: The New Synthesis*, Harvard University Press (1975).

- [16] Zahavi, A.: *The handicap principle: a missing piece of Darwin's puzzle*, Oxford University Press (1997).
- [17] 生天目章: ゲーム理論と進化ダイナミクス, 森北出版 (2004).
- [18] 泰地真弘人, 池上高志: ゲームにおける学習プレイヤーのダイナミクス, 認知科学, Vol.6, No.1, pp.21-30 (1999).



西本 恵太 (学生会員)

1990年生。2012年同志社大学理工学部情報システムデザイン学科卒業。同年4月名古屋大学大学院情報科学研究科入学。現在、博士前期課程在学中。2011年度同志社大学情報系優秀学生賞受賞。複雑系のダイナミクス、特に認知システムの発達・進化や社会における関係性ダイナミクスに興味を持つ。



イヴァン タネヴ

Ivan Tanev was born in 1964 in Simeonovgrad, Bulgaria. He earned M.S. (with honors) and Ph.D. degrees from Saint-Petersburg State Electrotechnical University, Russia in 1987 and 1993 respectively, and Dr.Eng. degree from Muroran Institute of Technology, Japan in 2001. He has been with the Bulgarian Space Research Institute (1987), Bulgarian Central Institute of Computer Engineering and Computer Technologies (1988-1989), Bulgarian National Electricity Company (1994-1997), Synthetic Planning Industry Co.Ltd., Japan (2001-2002), and ATR Human Information Science Laboratories (2002-2004), Japan. Since April 2013 he has been a professor at Doshisha University, Japan. Dr. Tanev's research interests include evolutionary computations, evolutionary robotics and multi-agent systems.



下原 勝憲

1952年4月8日生まれ。1976年九州大学工学部情報工学科卒業。1978年同大学大学院工修士課程修了。同年4月電信電話公社横須賀電気通信研究所入所。NTTコミュニケーション科学基礎研究所研究部長、国際電気通信基礎技術研究所(ATR)ネットワーク情報学研究所長等を経て、2006年より同志社大学工学部情報システムデザイン学科教授。2008年より同志社大学理工学部情報システムデザイン学科教授・同大学大学院理工学研究科情報工学専攻教授(現在に至る)。博士(工学)。関係性のデザイン、社会情報学の研究に従事。著書に『人工生命と進化するコンピュータ』(工学調査会, 1998), 『Biomolecular Computation for Bionanotechnology』(Artech House, 2007)等。IEEE, SICE, HI学会, AI学会, VR学会, 信学会等各会員。



鈴木 麗壘 (正会員)

1998年名古屋大学情報文化学部自然情報学科退学(飛び級)。2003年同大学大学院人間情報学研究科博士後期課程修了。博士(学術)。名古屋大学助教、カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員を経て、2010年名古屋大学大学院情報科学研究科准教授。現在に至る。人工生命手法に基づくエージェントモデリングに関する研究に従事。進化と学習の相互作用、協調行動の進化、進化計算のアートへの応用等に興味を持つ。International Society of Artificial Life, 人工知能学会, 計測自動制御学会, 日本進化学会, 日本数理生物学会各会員。



有田 隆也 (正会員)

1983年東京大学工学部計数工学科卒業。1988年同大学大学院工学系研究科修了。工学博士。名古屋工業大学講師、カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員を経て、現在、名古屋大学大学院情報科学研究科教授。人工生命や複雑系科学の研究に従事。言語の進化、人間行動の進化、進化的計算論等に興味を持つ。著書に『人工生命』(医学出版, 2002年), 『心はプログラムできるか』(ソフトバンククリエイティブ, 2007年), 『生物から生命へ』(筑摩書房, 2012年)等。人工知能学会, 電子情報通信学会, 日本認知科学会, 日本数理生物学会各会員。