

拡張マイノリティゲームにおける役割の分化と 切り替えダイナミクスの検討

西本 恵太^{1,a)} イヴァン タネヴ² 下原 勝憲² 鈴木 麗璽¹ 有田 隆也¹

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．我々は，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上で意思決定前のコミュニケーションを導入した．調整過程における他個体の振る舞いに対する鋭敏性を社会的知能の典型的な表れと考え，そ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．その結果，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鋭敏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，一方のプールが鋭敏性を減少させ，他方の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．

1. はじめに

マイノリティゲームは，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 [4]．奇数人の個体が独立して2択の選択肢から1つをば意思決定を行い，集団の中で少数派の選択をした個体が報酬を得る．極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研究されてきた [1], [2], [3], [6], [7], [8], [10]．

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．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訳ではなく，個体間で互いの様子を観察しながら意思決定をする状況も多く考えられる．本研究ではこの点に焦点を合わせ，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」をモデルに導入する．またコミュニケーション期間導入に際して，現実にもみられるような個体間の複雑な交渉を表現するため，各エージェントの意思表示および利得を連続値化する．我々は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

ような拡張を行った．

Dunbar は社会脳仮説 [5] 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，我々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複雑な社会的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社会的能力，つまり他者行動に対する鋭敏性が求められる．我々はこれを「社会応答性」と定義し，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する分析を行う．

2. インタラクティブ・マイノリティゲーム (IMG)

Challet ら [4] 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 $A_i (\in \{-1, 1\})$ とすると，その利得 $payoff (\in \{-1, 1\})$ は次のように定義される．

$$payoff = -A_i \operatorname{sgn} \left(\sum_{k=1}^N A_k \right), \quad (1)$$
$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0, \\ 0 & \text{if } x = 0, \\ -1 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

我々はこのモデルに2つの拡張を加える．まず第一に，

¹ 名古屋大学大学院 情報科学研究科
Grad. school of Information Science, Nagoya University

² 同志社大学 理工学部
Faculty of Science and Engineering, Doshisha University

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

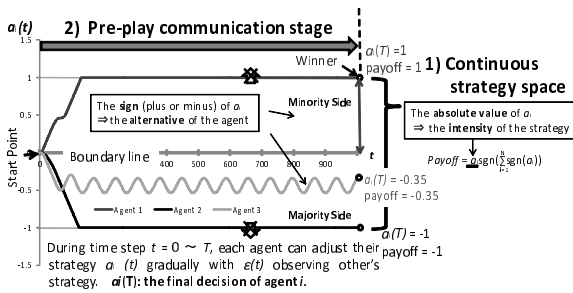


図 1 ゲームの例 (3 エージェント)。

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

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．

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

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

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，負けた時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示が可能になった．

第二に，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（ただし $a_i(0) = 0$ ），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変化量 $\epsilon(t)$ でこれを変化させる． $a_i(t) + \epsilon(t) > 1 (< -1)$ のときは $a_i(t+1) = 1 (-1)$ 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 軸は各エージェントの戦略値 $a_i(t)$ を表す．

3. モデル

3.1 エージェントの構成

本研究では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 $\epsilon(t)$ を決定するために 3 層リカレントニューラルネットワークで構成される．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 ϵ は $\epsilon(t+1) = \epsilon(t) + (a_u - a_d)/100$ として更新される．

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．まず 3 つの独立した遺伝子プールを用意し，各遺伝子型を一樣乱数 U によって設定した n_p 体の初期個体を生成する．各世代，各個体はランダムに選ばれた相手と R 回の 3 人版 IMG の対戦を行う．各個体の適応度は R 回の対戦による利得の累積と定義される．適応度に基づいて選ばれた n_e 体のエリート個体，エリート個体の遺伝子座に正規乱数を加えた $2n_e$ 体のエリートの子個体，ランダムに生成された $n_p - 3n_e$ 体から次世代を生成する．対戦から次世代生成までの操作を決められた世代数繰り返す．

3.3 社会応答性

他個体の行動変化に鋭敏に反応し，自らの行動を適応的に変化させる能力を本研究では「社会応答性」として定義し，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， $-1, 1, 0$ の内どれかひとつに定まる．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な戦略値領域内に存在したステップ数をカウントし，コミュニケーション期間中 T ステップ内に占める割合を求める．複数用意した固定環境での平均値を対象個体の社会応答性の指標とする．

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 節に挙げた方法によって 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

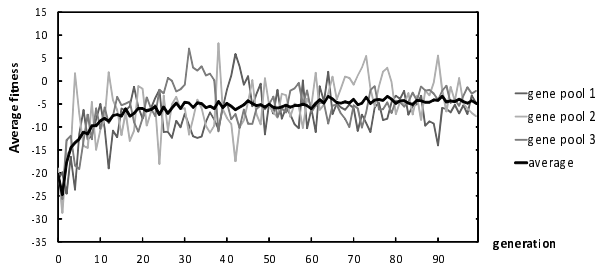


図 2 平均適応度の変化 .
 Fig. 2 Evolution of the average fitness.

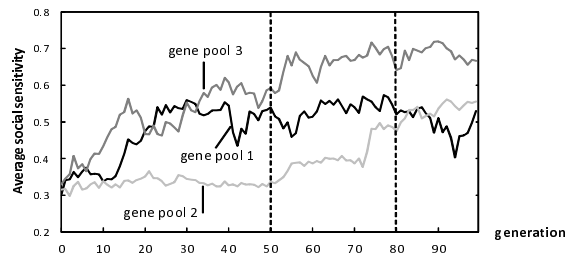


図 3 各遺伝子プールの社会応答性の進化 .
 Fig. 3 Evolution of the social sensitivity in each gene pool

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 $U = [-1, 1]$ ，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．

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 2 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．初期集団では -20 程度であった平均適応度は 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 3 は，図 2 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 4 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．

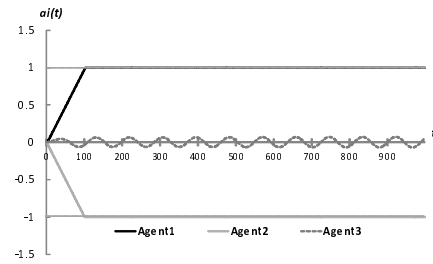


図 4 50 世代におけるエージェントの挙動 .
 Fig. 4 Behavior of agents at the 50th generation.

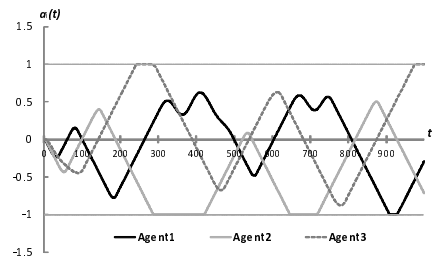


図 5 80 世代におけるエージェントの挙動 .
 Fig. 5 Behavior of agents at the 80th generation.

この状況において特徴的なのは，ゲームの勝利者を決定するのは常に敗者になる 0 付近に戦略値をとる 1 体であるということである．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「リスクテイカー」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 2 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．

図 5 は 80 世代のゲームで観察された，3 エージェントの戦略値が振動している様子を示す．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 3），図 5 の 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，このような振動現象が発生し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．社会応答性は常に増加する訳ではなく，進化の過程で減少と増加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 6(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．社会応答性の推移は大まかに次の 3 つのフェーズに分けるこ

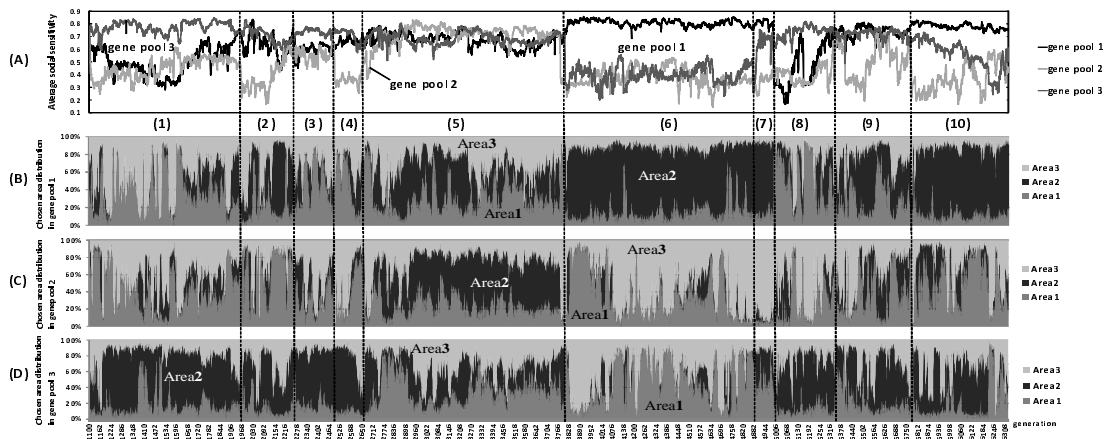


図 6 (A) 1100~6330 世代の各遺伝子プールの平均社会応答性。
(B)~(D) 1100~6330 世代の各遺伝子プールの個体を選んだ戦略値領域の傾向。

Fig. 6 (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.

とが出来る。

- 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 6 (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 6 (2),(4),(7),(9))。
- フェーズ 3: 全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 6 (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。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 4.5 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 はリスクテイカー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 6(B)~(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 6(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、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ことが確認できる。

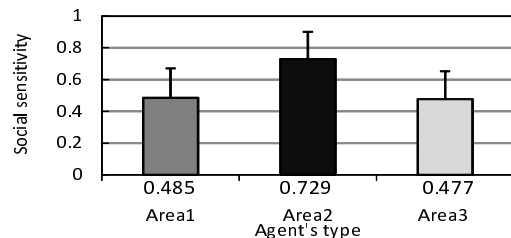


図 7 エージェントのタイプと社会応答性の関係。
Fig. 7 Agent's type and social sensitivity.

4.1 節においてリスクテイカー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る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、1つの遺伝子プールが領域 2 (キーエージェント)、残りの 2 プールが領域 1, 3 (リスクテイカー) の戦略値をとる傾向を継続して持った状態であり、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 がリスクテイカー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。例えば図 6 において (1), (3), (6) など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 6 (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、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を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 7）。この結果より、領域 2 の戦略値をとる傾向がある個体は、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ー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。

リスクテイカーは勝敗がキーエージェントの戦略値によって決まり、運が良ければ大きな利得を上げることができる。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上げることはできない。よってキーエージェントの個体には、リスクテイカー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、遺伝子プール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 役割分化と役割切り替えのメカニズム

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、およびその切り替えのメカニズムに関して分析を行う。図 8(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 8(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 へと遷移していく過程が観察できる。

3778 世代～3782 世代において、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。ハイリスク・ハイリターンな戦略をとるこの個体が運よく高い適応度を獲得したため、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

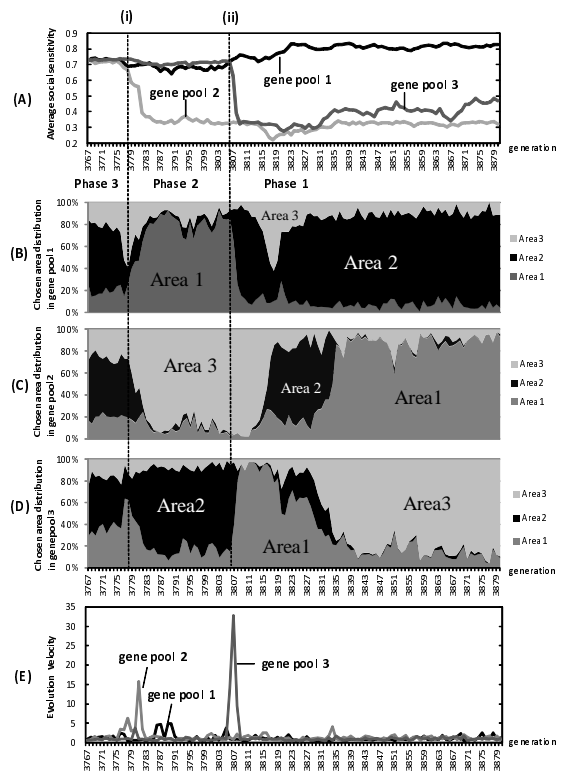


図 8 (A) 各遺伝子プールの平均社会応答性。
 (B)～(D) 各遺伝子プールの個体を選んだ戦略領域の傾向。
 (E) 各遺伝子プールの進化速度。
 Fig. 8 (A) Average social sensitivity of each gene pool.
 (B)～(D) Chosen area distribution in each gene pool.
 (E) Evolution velocity in each gene pool.

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 8(E) である*1（次ページ）。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 8(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 の個体を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 プールの個体が可塑的に対応する形で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り替えでも

みられる．3806 世代～3809 世代を境に，キーエージェントの役割を担っていた遺伝子プール3 とリスクテイカー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切り替えるというのは，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．遺伝子プール3 は社会応答性と可塑性を減少させることによって自らの担う役割を切り替え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 の役割切り替えが行われる．これはリスクテイカーの役割を担う2 プール間の役割切り替えである．両プールの社会的応答性の低さが，切り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 (リスクテイカー)，遺伝子プール3 が領域3 (リスクテイカー) 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一例である．

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得ない，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役割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分かった．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．集団間の役割切り替え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伴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可塑的に対応することによって行われていることが明らかになった．

ヒトは他の霊長類に比べて極めて高い社会的知能を持ち，またヒト社会における「役割」は，それらと比べ極めて豊富かつ重要であることが知られている [9]．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．

参考文献

- [1] Cavagna, A.: Irrelevance of memory in the minority game, *Phys. Rev. E*, Vol. 59, No. 4, pp. R3783–R3786 (1999).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] Dunbar, R. I. M.: The Social Brain Hypothesis, *Evolutionary Anthropology*, Vol. 6, pp. 178,190 (1998).
- [6] Kurihara, S., Fukuda, K., Hirotsu, T., Akaishi, O., Sato, S. and Sugawara, T.: How Collective Intelligence Emerge in Complex Environment?, *Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology*, Vol. Lecture Notes in Computer Science 3141, pp. 484–495 (2004).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] Wilson, E. O.: *Sociobiology: The New Synthesis*, Harvard University Press (1975).
- [10] 戸田皓治, 中村泰之: Minority Game における富のダイナミクス, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol. 47, No. SIG 1, pp. 138–143 (2006).

*1 ニューラルネットワークの54 の結合重みを表現する各遺伝子は，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の遺伝子の変化の大きさを表す．