

# 匿名ネットワーク環境下のゲームにおける 相手指名および行動戦略の進化

井 寄 幸 平

(受付 2019 年 5 月 31 日)

## 1. は じ め に

本研究では、匿名ネットワーク環境下でのゲームにおいてプレイヤーが自分の対戦相手および行動を選択するためのアルゴリズムを構築し、進化的手法によってどのような戦略パラメータが有効であるかを分析する。本研究ではネットワーク環境下のゲームとして「ネットワーク型四人のジレンマ」[4, 6, 11, 12] のモデルを用いる。これは従来の四人のジレンマ [1, 2, 3] と異なり、所属する集団内から自分で対戦相手を選択・指名し、その結果に基づいて対戦が行われるものである。現実社会においても、継続的な取引関係等は当事者間の意向によって形成・解消するものと考えられるため、より現実的な分析が可能である。

これまでの研究により、被験者実験で観察された行動は「相手の選択・指名」と「ゲームにおける行動選択」を共通の基準で決定する場合と、分離して別々の基準で決定する場合があることが示されている [9]。また、コンピュータシミュレーションによってそれぞれのアルゴリズムが持つ特性を分析し、相手選択と行動選択の基準を共通とするか分離するかによって、高い利得を得る戦略パラメータの分布が異なっていることが示された [8, 10]。これらは各アルゴリズムの持つ戦略パラメータがほぼ均等に分布している場合について示したものであるが、現実社会ではより高い利得を獲得するように行動が変化し、利得の少ない戦略は淘汰されていくのではないかと考えられる。

そこで本研究では、ネットワーク型四人のジレンマの対戦において、相手選択と行動選択を同じ基準値で行う場合（共通型アルゴリズム）と、相手選択と行動選択を別々の基準で行う場合（分離型アルゴリズム）のシミュレーションを構築し、進化的手法によってより優れた戦略パラメータの分析を試みる。

## 2. モデルの概要

ネットワーク型四人のジレンマでは、ゲームの対戦相手をプレイヤー自身が所属する集団の中から選択・指名する。ゲームにおける対戦相手は各プレイヤーの指名の結果および相手決定

のための規則に基づいて定められ、ゲームにおける行動選択は対戦相手の決定後に行われる。本研究では4名のプレイヤーを1集団とし、2種類の対戦相手決定規則を用いてゲームを行う。

## 2.1 ネットワーク型囚人のジレンマモデル

本研究におけるネットワーク型囚人のジレンマゲームは以下の手順で実施される。

- (1) 各プレイヤーは4名の集団内から対戦を希望する相手を1名選択・指名する。
- (2) 各プレイヤーの指名に基づいて対戦相手を決定する。なお、以下では対戦相手の決定したプレイヤー同士を「ペア」と呼ぶこととする。対戦相手の決定規則として以下の(a)指名ペア規則、(b)強制ペア規則、の2種類を使用する。
  - (a) 指名ペア規則：異なるプレイヤーがお互いを指名した場合にはペアを形成し、そうでないプレイヤーはゲームに参加しない(図1)。
  - (b) 強制ペア規則：まず互いの指名が一致したプレイヤー同士でペアを形成し、次に相互指名ではペアにならなかったプレイヤーがいればランダムに組み合わせてペアとする(図2)。
- (3) ペアが成立したプレイヤー同士で囚人のジレンマゲームの対戦を行う。プレイヤーが選択できる行動は「協力」もしくは「非協力」のいずれかである。
- (4) 各プレイヤーの行動の組み合わせによって、利得を決定する。なお指名ペア規則でペアにならなかったプレイヤーにも一定の利得が与えられる。

各プレイヤーが1ラウンドの囚人のジレンマゲームで得る利得は表1に示す利得表の通りである。なお指名ペア規則においてペアが成立しなかったプレイヤーが得る利得1は、ペアが成立した上で互いに非協力を選択した場合の利得に等しい。

表1 利得表

	協 力	非協力
協 力	3, 3	0, 5
非協力	5, 0	1, 1
ペア不成立：1 (指名ペア規則の場合)		

以上の手順を1ラウンドとし、同一集団、同一の対戦相手決定規則のもとで最終ラウンドまでおこなわれる複数回のラウンドを1セッションと定義する。本研究では100ラウンドをもって1セッションとする。

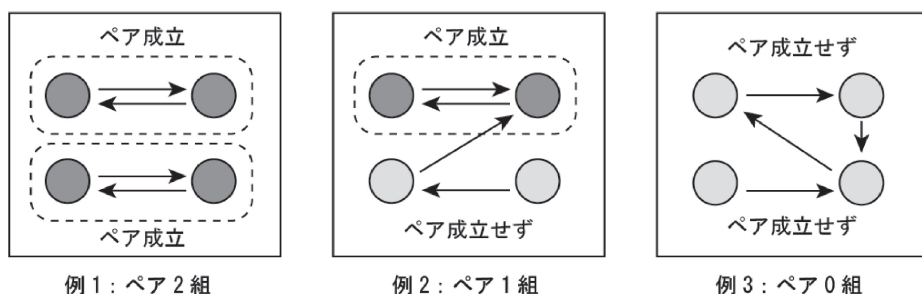


図 1 指名ペア規則によるペア形成例

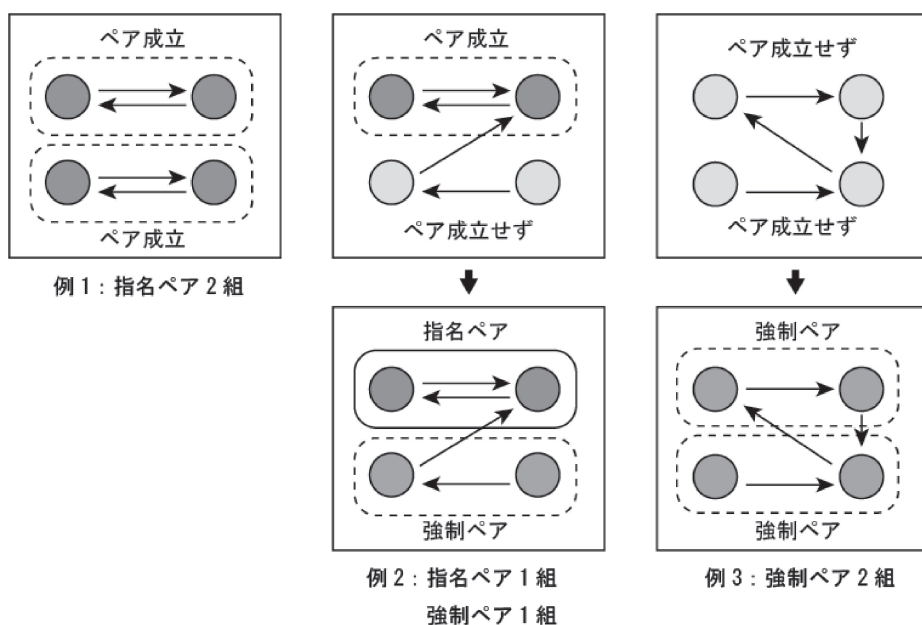


図 2 強制ペア規則によるペア形成例

## 2.2 「信頼度」を用いた意思決定アルゴリズム

本研究ではネットワーク型四人のジレンマにおける各プレイヤーの意思決定を、相手に対する主観的な評価値である「信頼度」に基づいて行うアルゴリズムを使用する。信頼度は「相手が自分を指名するか」と「対戦時に協力的であるか」を基準として決定され、値が大きいほど指名および協力的な行動に対する期待が高くなる。この値をもとに、各プレイヤーは対戦を希望する相手の指名、および協力・非協力の行動選択を行う。なお信頼度は相手の過去の行動履歴のうち、プレイヤーが自身の経験として知り得た情報を用いて更新されるものとし、以下の性質を満たすものと仮定する。

- (1) 信頼度は自分と相手の指名対象、および対戦時のゲームにおける行動に応じて増加もしくは減少する。
- (2) 値は 0 から 1 の間とし、対戦相手が常に同じ行動をとり続けた場合、それが協力であれば 1 に、非協力であれば 0 に収束する。
- (3) 過去の行動履歴には一定の割引率を乗じ、直近の行動ほど信頼度に大きな影響を与える。
- (4) 指名ペア規則においてプレイヤーが指名しなかった相手、および強制ペア規則において指名も対戦もしなかった相手に対する信頼度は変化しない。
- (5) 指名ペア規則において自分が指名した相手から指名されなかった場合、および強制ペア条件で指名した相手とペアにならなかった場合、相手の信頼度は減少する。

これらの条件を満たすため、まずラウンド  $t$  におけるプレイヤー  $i$  とプレイヤー  $j$  の行動から以下のような変数を定義する。

$$X_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & (\text{協力}) \\ 0 & (\text{非協力または指名せず}) \end{cases} \quad (1)$$

$$Y_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & (\text{指名}) \\ 0 & (\text{指名せず}) \end{cases} \quad (2)$$

$$Z_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & (\text{ペア成立}) \\ 0 & (\text{ペア成立せず}) \end{cases} \quad (3)$$

ここで  $X_{ij}(t)$  はラウンド  $t$  におけるプレイヤー  $i$  のプレイヤー  $j$  に対する行動である。ゲームの対戦が行われた場合、協力を選択すれば 1 に、非協力を選択すれば 0 となる。また指名ペア規則においてその相手を指名していない場合は 0 となる。次に  $Y_{ij}(t)$  はラウンド  $t$  においてプレイヤー  $i$  がプレイヤー  $j$  を指名したかどうかを示す変数である。相手を指名していれば 1、指名していなければ 0 となる。 $Z_{ij}(t)$  はラウンド  $t$  においてプレイヤー  $i$  とプレイヤー  $j$  がペアになったかどうかを示す変数である。相手と対戦ペアが成立していれば 1、成立していなければ 0 となる。これはペアの成立状態にのみ依存し、相互指名によるペアと強制ペア規則によりランダムに生成されたペアとは区別しない。これらの変数をもとに、以下の値を定義する。

$$W_{ij}(t) = \max\{Y_{ij}(t), Z_{ij}(t)\} \quad (4)$$

$W_{ij}(t)$  は  $Y_{ij}(t)$  と  $Z_{ij}(t)$  の最大値であり、ペアが成立した場合、および指名ペア規則において（ペアが成立していなくとも）相手を指名した場合には 1、それ以外の場合で 0 となる。

以上の変数を用いて、各プレイヤーの持つ信頼度を定義する。本研究では信頼度の付与にあたって「相手の指名」と「ゲーム対戦時の行動」を一体として共通で評価する場合と、それ

それぞれ分離して評価する場合を考え、それぞれ「共通型」信頼度、「分離型」信頼度と呼ぶことにする。

### 2.3 共通型信頼度：相手の指名と行動を共通して評価する場合

まず相手の指名と行動を共通して評価する共通型信頼度を  $T_{ij}(t)$  とし、以下のように定義する。

$$T_{ij}(t) = W_{ij}(t) \left( \frac{1}{1+r_i} \right) \left\{ r_i X_{ji}(t) + T_{ij}(t-1) \right\} + \left\{ 1 - W_{ij}(t) \right\} T_{ij}(t-1) \quad (5)$$

ここで  $r_i$  はプレイヤー  $i$  が持つ、対戦相手の過去の行動評価に対する割引率である。 $r_i$  の値が大きいほど相手の直前の行動に対する信頼度の変化は大きくなり、 $r_i = 0$  であれば相手の行動に関わらず信頼度の値は不変となる。

(5) 式の信頼度を用いる場合、ペアが成立した場合はその相手の行動によって信頼度が増加する。相手が協力を選択した場合には信頼度が増加し、非協力を選択した場合には信頼度が減少する。また自分が指名した相手から指名されず、かつ強制ペア条件でもペアとならなかった場合は信頼度が減少する。なお指名ペア規則において指名しなかった相手、および強制ペア規則で指名もペア成立もしなかった相手の信頼度は変化しない。

共通型信頼度を用いる場合、各プレイヤーは対戦相手の指名、およびペアが成立した場合の行動決定の両方に (5) 式の信頼度を用いる。対戦相手を指名するときには、各プレイヤーは集団内で最も高い信頼度を持つプレイヤーを指名する。もし複数のプレイヤーが条件に合致する場合は、その中から 1 名をランダムに選択し指名する。次にペアが成立した場合、その相手に対する信頼度を相手に対する協力確率とする。例えば信頼度が 0.7 であれば 70% の確率で協力、30% の確率で非協力を選択するものとする。

### 2.4 分離型信頼度：相手の指名と行動を分離して評価する場合

次に相手の指名と行動を分離して評価する分離型信頼度について考える。あるプレイヤーが相手を指名する場合、過去に指名した相手とペアが成立したかどうか、ペアが成立していた場合はその相手の過去の行動、が評価の対象となるため、(5) 式の信頼度  $T_{ij}(t)$  と同じ式を利用できる。これを「指名信頼度」とし、 $N_{ij}(t)$  で表すことにする。次にプレイヤーがゲームにおける行動を決定するための相手の評価値として「行動信頼度」を定義し、 $A_{ij}(t)$  と表す。行動信頼度では、どの相手を指名したかとは分離して、実際に対戦を行った相手の行動履歴のみに基づいて評価を行う。指名信頼度、行動信頼度について上記の (1)～(4) 式を用いて以下のように定義する。

$$N_{ij}(t) = W_{ij}(t) \left( \frac{1}{1+r_i} \right) \left\{ r_i X_{ji}(t) + N_{ij}(t-1) \right\} + \{1 - W_{ij}(t)\} N_{ij}(t-1) \quad (6)$$

$$A_{ij}(t) = Z_{ij}(t) \left( \frac{1}{1+r_i} \right) \left\{ r_i X_{ji}(t) + A_{ij}(t-1) \right\} + \{1 - Z_{ij}(t)\} A_{ij}(t-1) \quad (7)$$

ここで割引率  $r_i$  は相手の行動変化に対する信頼度の変化量、言い換えればそのプレイヤーの寛容度に対応している。現実的には個人の性格や特性に依存すると思われるため、相手の指名と行動決定について極端に異なる値を持っているとは考えにくい。そのため本研究では  $r_i$  の値について、同一プレイヤーの  $N_{ij}(t)$ 、 $A_{ij}(t)$  の中では共通の値とする。

(6) 式の指名信頼度を用いて相手の期待値を評価する場合、ペアとなった相手に対しては相手の行動、ペアとならなかった相手に対しては指名の状態に基づいて増減する。これは相手が「自分を相手として指名しそうか」、また「ペアとなった場合には協力的であるか」を測るものとなる。

次に (7) 式の行動信頼度を使用して相手を評価する場合、ペアが成立していないプレイヤーの行動信頼度は変化しない。ペアとなった相手についてのみ、相手が協力を選択すれば増加し、非協力を選択すれば減少する。つまり純粹に過去の対戦履歴のみに基づいて「相手が協力的な行動を選択するか」を測ることになる。意思決定を行う際には、各プレイヤーは指名戦略として集団内で指名信頼度  $N_{ij}(t)$  の最も大きいプレイヤーを指名する。もし  $N_{ij}(t)$  が最大となるプレイヤーが複数いる場合はその中からランダムに 1 名を指名する。次にペアが形成された場合、プレイヤーは行動信頼度  $A_{ij}(t)$  の値を相手への協力確率として使用し、行動を決定する。

### 3. シミュレーション

上記のアルゴリズムを用い、様々な条件下で有効な戦略パラメータを分析するため、進化的手法によるシミュレーションを行う。特に、プレイヤーの戦略的特徴を表す数値である割引率  $r_i$  と信頼度の初期値  $T_{ij}(0)$ 、 $N_{ij}(0)$ 、 $A_{ij}(0)$  に着目し、以後これらを「戦略パラメータ」と呼ぶことにする。 $r_i$  は相手の行動に対して信頼度がどの程度敏感に変動するかを示しており、例えば相手の非協力的行動に対して報復するまでの猶予などに影響する。信頼度の初期値は初見の相手に対してどのように行動するかを決定するものであり、情報のない相手に対しても協力しやすいかどうかを示している。これらの戦略パラメータの組み合わせは、プレイヤーが採用している戦略の特徴となるため、こういった戦略が有効に機能しているかを推定することが可能である。



### 3.1 進化的手法による行動戦略の分析

本研究で使用する進化的手法は、有効な、つまり高い利得を獲得する戦略の複製とそうでない戦略の淘汰、および突然変異による新たな戦略の生成を基本とする。具体的には以下の手順によって戦略パラメータを進化させ、どのような値が生き残り増加するかを検証する。

- (1) 戦略パラメータの初期値をランダムに生成し、4名のプレイヤーによる集団を100個作成する。
- (2) それぞれの集団ごとに並行して100ラウンド（1セッション）のネットワーク型囚人のジレンマゲームを行い、最終的に得た利得を計算する。
- (3) 全ての戦略のうち、最終利得の上位10%の戦略パラメータを複製し、下位10%のものと入れ替える。
- (4) 全ての戦略パラメータに対して3%の確率で突然変異を起こす操作を実施し、変異が起こった際には新しくランダムな値のパラメータを生成する。
- (5) (1)～(4)の手順を「1世代」とし、100世代の繰り返しによって戦略パラメータを進化させる。
- (6) (1)～(5)の手順をさらに100回繰り返し、進化する戦略パラメータの平均値を計算する。

ここで割引率  $r_i$  と信頼度の初期値  $T_{ij}(0)$ ,  $N_{ij}(0)$ ,  $A_{ij}(0)$  はいずれも  $0 \sim 1$  の範囲とし、0.1間隔でランダムに生成する。また同じプレイヤーの  $N_{ij}(0)$  と  $A_{ij}(0)$  は共通の値とする。シミュレーションでは指名ペア規則、強制ペア規則それぞれの下で共通型信頼度を使用するアルゴリズムと、分離型信頼度を使用するアルゴリズムの両方について実施し、ペア形成規則と意思決定アルゴリズムの違いによってどのように戦略パラメータが進化するかを検証する。

### 3.2 指名ペア規則におけるシミュレーション結果

図3および図4は指名ペア規則のもとで、それぞれ共通型信頼度と分離型信頼度を用いたアルゴリズムにおける戦略パラメータの変化である。グラフの横軸はシミュレーションの世代であり、縦軸は戦略パラメータの平均値を示す。

図3より、共通型信頼度を用いて指名ペア規則のもとでシミュレーションを行った場合、割引率  $r_i$ 、信頼度の初期値  $T_{ij}(0)$  ともにゆるやかに増加していくことが分かる。これに対し、図4より分離型信頼度を用いた場合には、信頼度の初期値は比較的早い段階で上昇し、その平均値も共通型のときより大きく、ほぼ最大値である1に近づいている。しかしながら割引率はほぼ変化しておらず、共通型の場合と比べても低い値となっていることが分かる。

次に図5は、共通型、分離型それぞれのアルゴリズムにおいて、1セッション内でプレイヤーが得た利得の平均値の推移である。共通型信頼度を用いた場合、利得は非常に緩やかだが

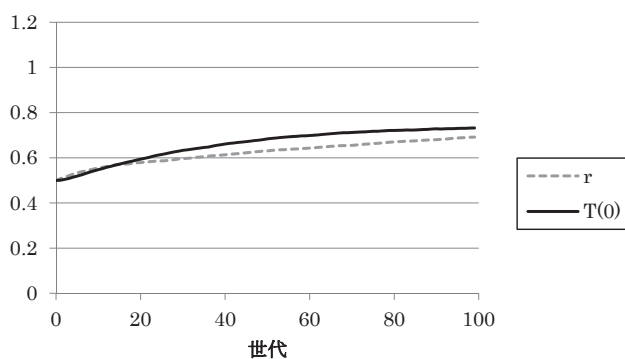


図 3 共通型信頼度を用いた場合の戦略の進化 (指名ペア規則)

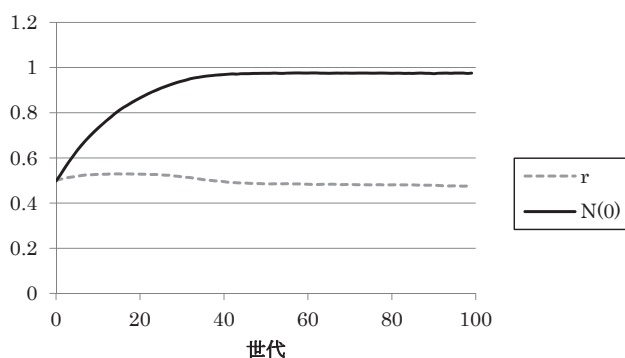


図 4 分離型信頼度を用いた場合の戦略の進化 (指名ペア規則)

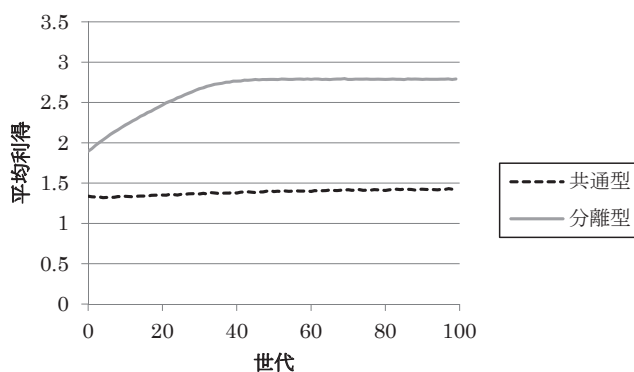


図 5 指名ペア規則における平均利得の推移

世代を経て増加する。分離型信頼度を用いた場合には平均利得が大幅に、かつ早い世代から増加し、最終的には共通型信頼度を用いた場合よりもかなり大きな値に到達している。

さらに、世代を通じて各戦略パラメータの分布がどのように変化していったかを示す。図



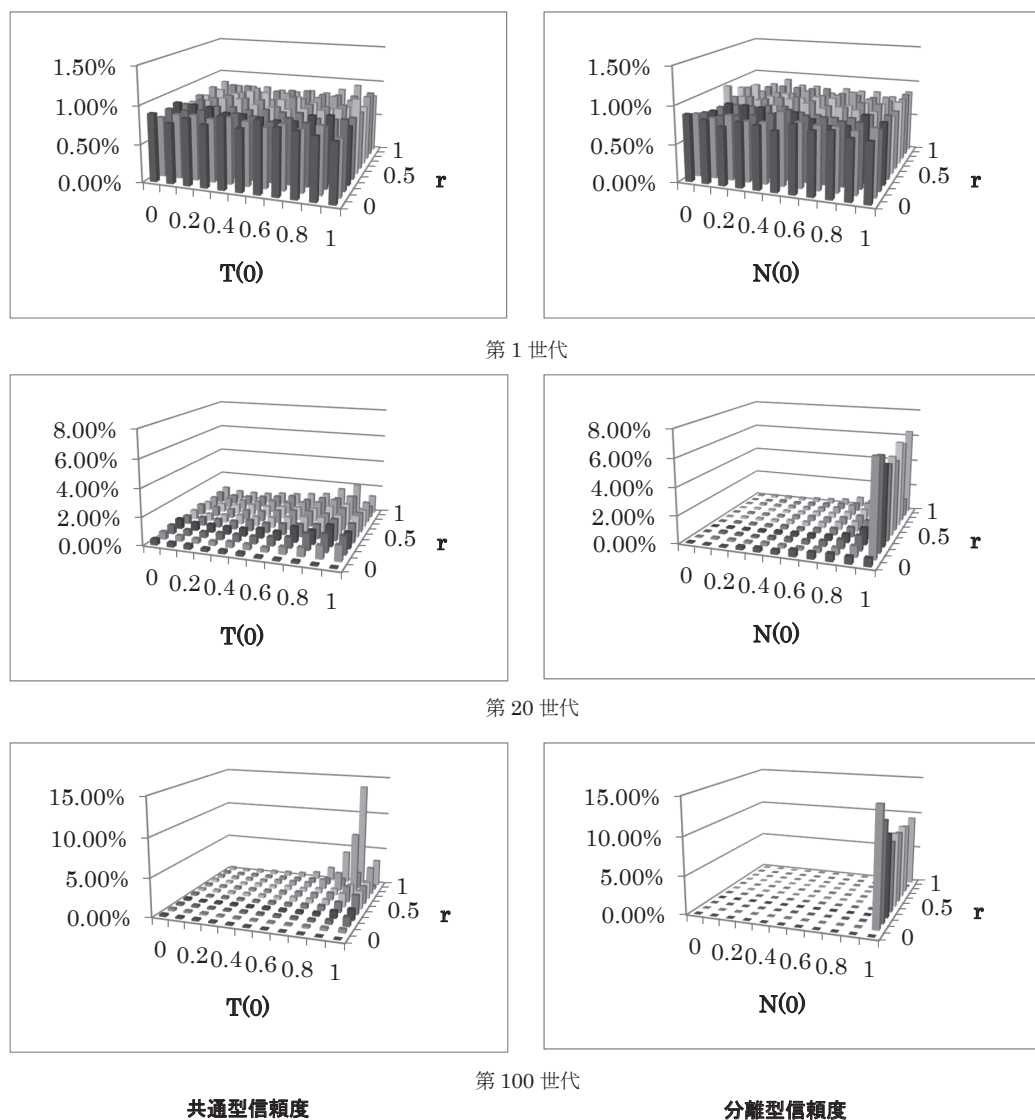


図6 指名ペア規則における戦略パラメータの分布推移

6は共通型・分離型の信頼度を用いた際の戦略パラメータの分布の推移である。

図6より、共通型信頼度を用いた場合には割引率および信頼度の初期値がほぼ均等な分布から徐々に大きい値の方へと収束して行くことが分かる。第100世代に生き残っている戦略のうち最も多いのは割引率  $r_i$  が1.0、信頼度の初期値  $T_{ij}(0)$  が0.9のもので、約14%を占めている。またこの付近を中心にいくつかの戦略が多めに生き残っているが、信頼度の初期値が最大の1付近になるとその割合は低下する。

また図 6 より、分離型信頼度を用いた場合は共通型とは異なる収束状態が見られた。当初はほぼ均等に分布していた戦略パラメータは、早い段階から信頼度の初期値  $N_{ij}(t)$  が 1.0 となる部分に集中して行く。しかしながら割引率  $r_i$  については 0.0 となる部分を除いて全体的に分布しており、共通型信頼度の場合とは大きく異なる結果となった。

### 3.3 強制ペア規則におけるシミュレーション結果

図 7 および図 8 は、強制ペア規則を用いた際の戦略パラメータの進化の様子である。共通型信頼度、分離型信頼度を用いた 2 つの条件下でシミュレーションを実施した結果、両者ともほぼ同様の傾向を示した。いずれのアルゴリズムにおいても、信頼度の初期値は比較的早い世代から増加し、0.85 付近で安定する。逆に割引率は開始時点から緩やかに減少し、100 世代では 0.3 付近となる。指名ペア規則の下では共通型信頼度を使用した際には増加、分離型信頼度を使用した場合はほぼ変化なしであったことと比べて、信頼度のアルゴリズムによって大きな差が見られない結果となった。

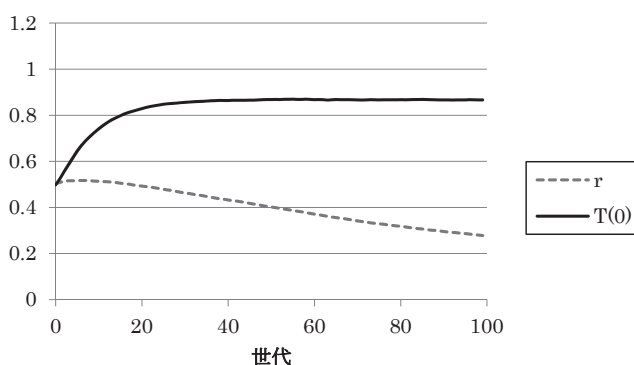


図 7 共通型信頼度を用いた場合の戦略の進化（強制ペア規則）

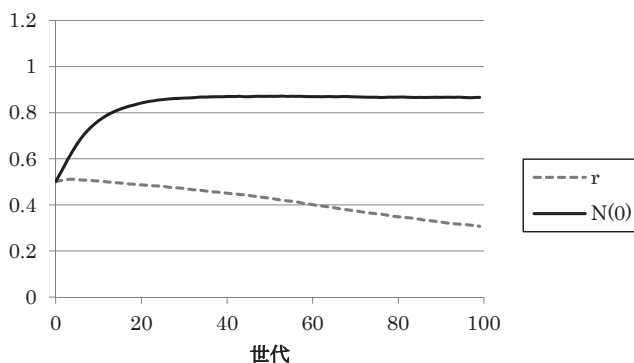


図 8 分離型信頼度を用いた場合の戦略の進化（強制ペア規則）

次に図9は平均利得の推移である。開始時点で若干の差があるが、いずれも増加し、差も小さくなってくる。指名ペア規則の際には使用する信頼度のアルゴリズムによって大きな差があったこととは対照的に、概ね同様の推移を示すことが分かった。また平均利得の数値自体も2.8~2.9前後に到達しており、指名ペア規則で平均利得の高かった分離型信頼度の場合と比べても同等もしくはやや上回る結果となった。

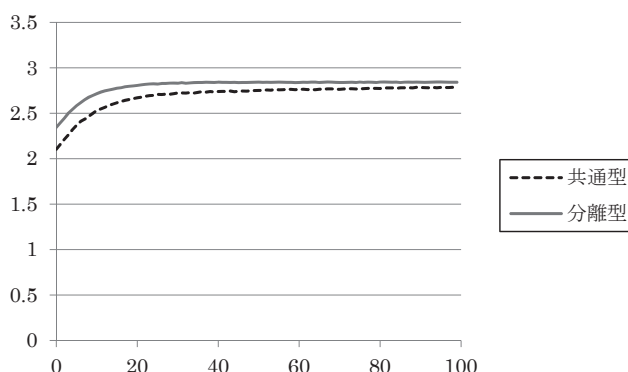


図9 強制ペア規則における平均利得の推移

図10は強制ペア規則の下での戦略パラメータの分布の推移である。指名ペア規則の場合とは異なり、強制ペア規則においては信頼度アルゴリズムによる大きな差異は見られなかった。共通型、分離型いずれも当初はほぼ均等に分布しており、そこから信頼度の初期値が大きい方へと集中していく様子が分かる。その後は徐々に割引率が低い方へと推移して行くが、信頼度の初期値が最大の1のもの、および割引率が最小の0のものはほぼ生き残らず、割引率0.1、信頼度の初期値0.9の部分に一極集中する形になっている。これらの推移も指名ペア規則のシミュレーション結果とは大きく異なっており、ペア形成の条件によっても有効な戦略パラメータが大きく異なることが示された。

#### 4. 結果の考察

進化的手法を用いたシミュレーションの結果から、ペア形成規則および信頼度の評価方法の違いにより戦略パラメータの進化に大きな差異が観察されることが分かった。相互指名によってのみペアが形成される指名ペア規則の下では、共通型信頼度と分離型信頼度で結果が全く異なっている。これはペア形成の難しさに起因するものと考えられる。指名ペア規則では相互指名以外にペアを形成する手段がないため、共通型信頼度を用いた場合は仮に協力的な相手であったとしても、ペア形成の失敗により相手の評価値が減少して行く。これにより

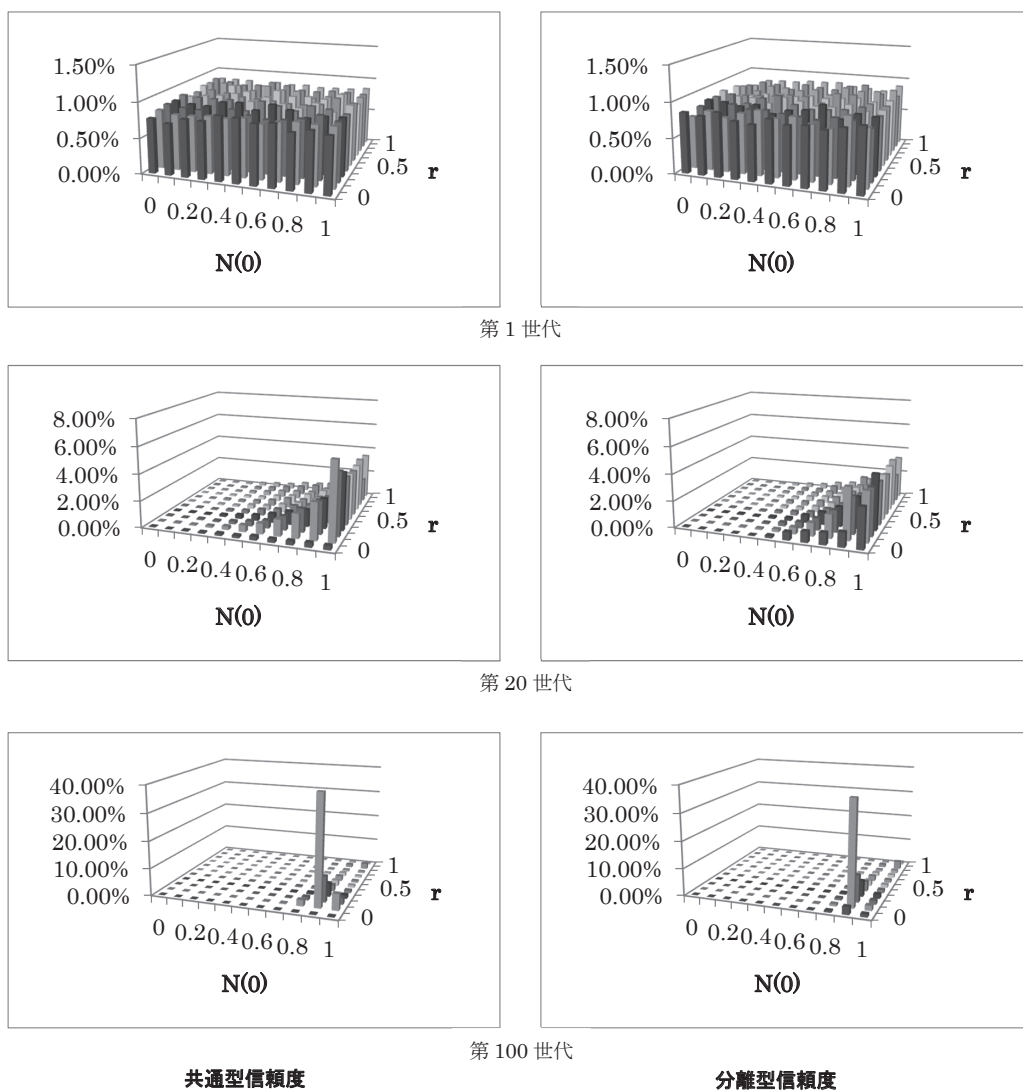


図10 強制ペア規則における戦略パラメータの分布推移

さらに協力的なペア形成がしづらくなるという悪循環に陥り、最終的に獲得する平均利得にも大きな差が出たものと言える。戦略パラメータについて見ると、信頼度の初期値はいずれも増加するが、分離型の方がより大きい。割引率は共通型で増加、分離型でほぼ変化なしとなった。このゲームにおいては協力的な関係を長期間維持することが高い利得につながるため、信頼度の初期値は高い方が協力的となり、利得が増加したと思われる。割引率は相手の行動に対する反応の敏感さに対応するが、相手の評価を一つの値で行う共通型の場合は相手の指名状態および行動に迅速に対応することが利得につながったと言える。ただしペア形成

の失敗が評価の減少につながり、後にペアを形成した相手から非協力的に振る舞われる可能性がある。これに対応するため、高すぎる信頼度の初期値は排除されたものと思われる。対して分離型の場合は相手の指名と行動を別に評価することから、ペア形成の失敗が行動の評価にはつながらない。そのため割引率の値がそれほど全体に影響せずに分布し、信頼度の初期値は最大値まで増加したものと考えられる。

強制ペア規則の下では、信頼度を評価するアルゴリズムの違いはあまり全体に影響を与えていない。強制ペア規則では指名の状況に関わらず対戦相手を得ること自体は可能であるため、「ペアを組んだ相手と協力的な関係を維持する」ことが高い利得につながる。そこで協力的に行動した戦略が生き残り、信頼度の初期値が上昇すると思われる。このとき、相手の行動に過敏に反応することはかえって相手からの信頼度の減少を招く可能性があることから、割引率の値は増加せずむしろ減少していったものと考えられる。ただし、無条件に相手に協力するような状態になると非協力的な相手から搾取されてしまうため、戦略が進化する過程で信頼度の初期値は最大値の1ではなくそれよりやや低い0.9付近が最大となったと思われる。

これまでの研究 [5, 7, 9] で実施した被験者実験では、指名ペア規則の下でセッションを経験した被験者は次のセッションで大きく平均利得や協力率が上昇することが観察された。今回のシミュレーション結果を見る限り、被験者は当初は共通型信頼度のような形で相手の評価を行っており、その状態で学習したというよりも経験を経て相手の評価方法自体を分離型に近いものに切り替えたのではないかと推定される。強制ペア規則の下では評価方法の切り替え自体にあまり利点がないため、積極的な評価方法の変更は起こらなかったのではないと思われる。

## 5. ま と め

本研究ではプレイヤーが相手とゲームの行動を決定する際に基準となる数値「信頼度」について、相手指名と行動選択を共通の値で評価する共通型信頼度と、指名と行動選択を別に評価する分離型信頼度を使用し、進化的手法によって戦略の進化を試みた。

シミュレーションにより、特に指名ペア規則によるペア形成を行う場合に共通型信頼度と分離型信頼度で大きな違いが発生することが確認された。プレイヤーの獲得した平均利得を見ると、分離型信頼度を用いた方がより大きな利得を獲得することができるようになる。過去の被験者実験の結果と比較すると、指名ペア規則の下では被験者は経験を通じて信頼度の評価方法を切り替えているのではないかと考えられる。強制ペア規則の下では大きな違いは観察されなかったが、これは指名によるペア形成に失敗しても対戦相手を確保できることが影

響している。戦略パラメータの変化もほぼ同様の経過をたどっており、ペア形成規則がプレイヤーの行動戦略の選択および進化に大きく関わっていることが示された。

今回のシミュレーションではグループ人数、セッションの回数等は固定して行ったが、今後は多人数の中から複数の相手を選択できる場合や、セッションの回数が増える場合など、より複雑で現実的な形での研究を進めて行きたい。

## 参 考 文 献

- [1] Axelrod, R.: *The Evolution of cooperation*, Basic Books, 1984.
- [2] Axelrod, R.: *The Complexity of cooperation*, Princeton University Press, 1987.
- [3] Erev, I. and Roth, A. E.: *Simple reinforcement learning models and reciprocation in the prisoner's dilemma game*, *The Bounded Rationality: The Adaptive Toolbox*, pp. 215–231, MIT Press, 2002.
- [4] Hayashi, N. and Yamagishi, T.: *Selective play: Choosing partners in an certain world*, *Personality and Social Psychology Review*, Vol. 2, pp. 276–289, 1998.
- [5] Iyori, K.: *Prisoner's dilemma network: Experiments and Simulations*, *System Sciences for Economics and Informatics*, S. Hiraki and M. Sakaguchi (eds.), Kyushu University Press, pp. 35–49, 2007.
- [6] Yamagishi, T., Hayashi, N. and Jin, N.: *Prisoner's dilemma network: Selection strategy versus action strategy*, *Social Dilemmas and Cooperation*, Springer Verlag, pp. 233–250, 1994.
- [7] 井寄幸平, 鳩野逸生, 小田宗兵衛, 上田完次, 「ネットワーク型囚人のジレンマにおける協調行動の創発に関する研究」, システム制御情報学会論文誌, 第16巻第9号, pp. 36–43, 2003.
- [8] 井寄幸平, 「ネットワーク型囚人のジレンマにおける信頼度に基づく戦略のシミュレーション」, 経済科学研究, 第13巻第1号, pp. 23–37, 2009.
- [9] 井寄幸平, 「ネットワーク環境下における相手決定規則と経験の影響に関する研究」, 経済科学研究, 第18巻第1号, pp. 23–36, 2014.
- [10] 井寄幸平, 「ネットワーク環境下のゲームにおける相手指名および行動選択に関する戦略シミュレーション」, 経済科学研究, 第20巻第2号, 2017.
- [11] 神 信人, 林直保子, 篠塚寛美, 「ネットワーク型囚人のジレンマの実験的研究: PD 関係におけるコミットメントの形成」, 実験社会学研究, 第33巻第1号, pp. 21–30, 1993.
- [12] 林直保子, 神 信人, 山岸俊男, 「ネットワーク型囚人のジレンマ: 戦略のシミュレーション」, 社会心理学研究, 第8巻第1号, pp. 33–43, 1993.