

# 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

井 寄 幸 平

(受付 2016 年 10 月 31 日)

## 1. は じ め に

本研究では、自由に対戦相手を選択できるネットワーク環境下でのゲームにおいて、プレイヤーが持つ意思決定アルゴリズムとその戦略パラメータが最終的な利得にどのように影響しているかについて分析する。本研究で用いる「ネットワーク型囚人のジレンマ」[4, 6, 10, 11]では、従来の囚人のジレンマモデル [1-3] と異なり、対戦相手の自発的選択による関係の構築が可能である。現実社会でみられる継続的な取引関係は、当事者間の合意に基づいて形成したり解消したりするものが多く、これらをモデル化したネットワーク型のゲームによりその分析が可能となる。

これまでの研究 [5-9] により、ネットワーク型囚人のジレンマの被験者は「相手の選択・指名」と「ゲームにおける行動選択」について共通の基準で決定する場合と、対戦経験を経てそれらを別々の基準により決定する場合があることが示されている。そこで本研究では、ネットワーク型囚人のジレンマの対戦において相手を指名するための基準値と行動を決定するための基準値を共通とするアルゴリズムと、分離して評価するアルゴリズムの2種類を構築し、それぞれの戦略が持つ特性についてコンピュータシミュレーションを用いた分析をおこなう。

## 2. モデルの概要

本研究で取り扱うネットワーク型囚人のジレンマでは、通常の囚人のジレンマとは異なりゲームの対戦相手を自身が所属する集団の中から選択・指名することができる。実際のゲームにおける対戦相手は各プレイヤーがおこなった指名の結果に基づいて決定され、対戦相手の決定後にゲームの行動を選択する。本研究では4名のプレイヤーを1つの集団とし、2種類の対戦相手決定規則を用いてゲームをおこなう。この際に誰を対戦相手として指名するか、また対戦の際にどのような行動をとるかについて、各プレイヤーの特性と過去の対戦経験を基にした戦略アルゴリズムを構築し、コンピュータシミュレーションによって戦略の評価をおこなう。

## 2.1 ネットワーク型囚人のジレンマ

本研究におけるネットワーク型囚人のジレンマのゲームは以下の手順で実施される。

- (1) プレイヤ4人で1組の集団を形成する。
- (2) 各プレイヤは集団内から対戦を希望する相手を1名選択し指名する。
- (3) 各プレイヤの指名に基づいて対戦相手を決定する。対戦相手の決定規則として以下の(a), (b)の2種類を使用する。なお, 対戦相手の決定したプレイヤ同士を「ペア」と呼ぶこととする。
  - (a) 異なるプレイヤがお互いを指名した場合のみペアを形成し, 相互指名にならなかったプレイヤはゲームに参加しない。(図1)。この規則を「指名ペア規則」とする。
  - (b) まず互いの指名が一致したプレイヤ同士でペアを形成し, 次に残ったプレイヤをランダムに組み合わせてペアとする(図2)。この規則を「強制ペア規則」とする。また, このとき互いの指名で形成されたペアを指名ペア, 指名ペアにならずランダムに組み合わされたペアを強制ペアと呼ぶことにする。
- (4) ペアが成立したプレイヤ同士で囚人のジレンマゲームの対戦をおこなう。プレイヤが選択できる行動は「協力」か「非協力」のいずれかであり, 選択した行動を同時に相手に伝える。
- (5) 各プレイヤ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にも利得は与えられる。

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。

また, 各プレイヤが1ラウンドの囚人のジレンマゲームで得られる利得は表1に示す利得表の通りとする。なお指名ペア規則においてペアが成立しなかった場合, 相手のいないプレイヤの利得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と同じ1とする。

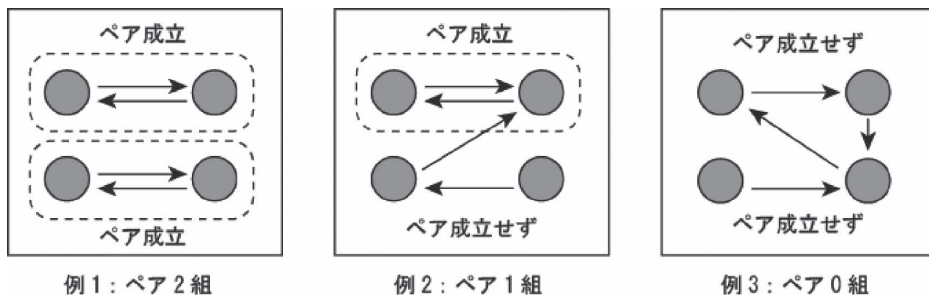


図1 指名ペア規則によるペア形成例

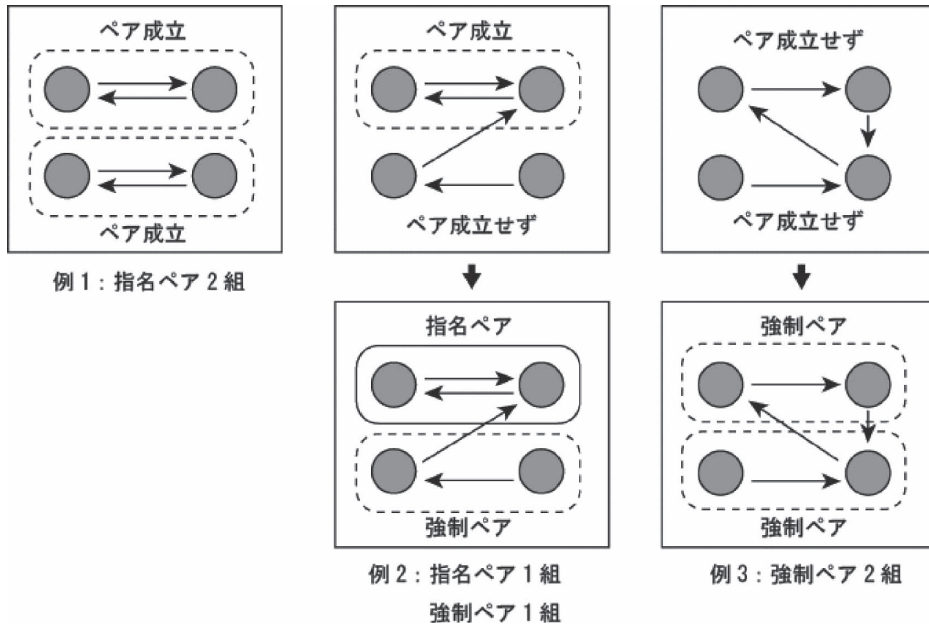


図 2 強制ペア規則によるペア形成例

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 (指名ペア規則のみ)		

## 2.2 意思決定アルゴリズム

本研究ではネットワーク型囚人のジレンマにおける各プレイヤーの相手指名および行動を、相手に対する主観的な評価値によっておこなうアルゴリズムを使用する。この評価値は「相手が自分を指名しそうか、また協力的であるか」を基準として決定され、値が大きいほど協力的な行動に対する期待が高くなる。この値を「信頼度」として定義し、相手の指名、および協力・非協力の行動決定に用いる。信頼度は相手の過去の行動履歴のうち、自分が知り得た情報を用いて継続的に更新することとし、以下の性質を満たすものと仮定する。

- (1) 信頼度の値は相手の指名およびゲームにおける行動に応じて増加または減少する。
- (2) 値は 0 から 1 の間とし、相手が常に同じ行動をとり続けた場合、1 または 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、直近の行動ほど高く評価する。
- (4) 指名ペア条件において、指名しなかったプレイヤーに対する信頼度は変化しない。

(5) 指名ペア条件において、自分が指名した相手から指名されなかった場合、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。

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

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。

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

$Y_{ij}(t)$  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。

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

$Z_{ij}(t)$  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。

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

$W_{ij}(t)$  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条件においてペアが成立しなくとも相手を指名した場合に 1、それ以外の場合で 0 となる。

次に上記の変数を用いて、各プレイヤーの持つ信頼度を定義する。ここで、信頼度を付与する対象として①相手の指名と行動を共通して評価するもの、②相手の指名と行動を分離して考えるもの、の 2 種類を考える。

### 2.3 相手の指名と行動を共通して評価する信頼度

まず①相手の指名と行動を共通して評価対象とする信頼度を  $T_{ij}(t)$  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

度の値が変化しなくなる。

(5) 式の信頼度を用いる場合、ペアが成立した相手に対してはその相手の行動によって信頼度が変化する。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にもかかわらず相手からは指名されず、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。指名ペア条件において指名しなかった相手および強制ペア条件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。

このとき、各プレイヤーは(5)式の信頼度を用いて、対戦相手の候補となる相手の指名とペアになった場合の行動決定をおこなう。まず指名戦略として、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。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後の行動については、相手の信頼度自体を相手に対する協力の確率とする。例えば信頼度が0.6の場合は60%の確率で協力、40%の確率で非協力を選択するものとする。以下ではこの意思決定方法を「共通型」のアルゴリズムと呼ぶことにする。

## 2.4 相手の指名と行動を分離して評価する場合の信頼度

次に②相手の指名と行動を分離して評価する場合の信頼度について考える。相手の指名においては、指名した相手とペアを組めたかどうか、ペアを組めた場合は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」と定義し、 $N_{ij}(t)$  で表すことにする。次に相手のゲームにおける行動の評価値として「行動信頼度」を定義し、 $A_{ij}(t)$  と表す。行動信頼度では、相手の指名およびペア形成とは独立に、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おこなう。これらについて、以下のように定義する。

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

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

割引率  $r_i$  は相手の行動変化に対してどの程度敏感に評価値を変化させるか、いわばそのプレイヤーの寛容度に対応しているため、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、 $N_{ij}(t)$ 、 $A_{ij}(t)$  とも共通の値を採用しているものとする。

(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、(5)式と同様にペアとなった相手に対しては相手の行動に基づいて増減し、ペアとならなかった場合は指名の状態によ

て増減する。これは相手が「自分を指名してくれそうか、またペアとなった場合は協力的であるか」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、ペアとならなかった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。これにより、純粋に過去の対戦履歴から「相手の協力的な行動に対する期待値」を測ることになる。

この場合は、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。なお  $N_{ij}(t)$  が最大となるプレイヤーが2名以上いる場合はその中からランダムに指名する。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。以下ではこの意思決定方法を「分離型」のアルゴリズムと呼ぶことにする。

### 3. シミュレーション

2章で述べたアルゴリズムを用いて、様々な戦略を持つプレイヤー同士を対戦させることによりそれぞれのアルゴリズムの特性と、パラメータの違いによる結果の違いを検証する。特にプレイヤーの戦略における特徴を表すパラメータとして割引率  $r_i$  と信頼度の初期値  $T_{ij}(0)$ 、 $N_{ij}(0)$ 、 $A_{ij}(0)$  に着目する。 $r_i$  は相手の行動に対し評価値の変化がどの程度敏感に変動するかを示しており、例えば相手が非協力を選択した場合直ちに評価を低下させて対戦相手の候補から外すまたは非協力を返すか、しばらくは我慢して相手の出方をうかがうか、といった違いが表れる。信頼度の初期値は全く情報のない相手に対してどのように振る舞うかを決定するものであり、初めて対戦する相手に協力しやすいかどうかなどを示している。よってこれらのパラメータの組み合わせにより、プレイヤーがどのような戦略をとっているかが規定される。

シミュレーションは以下の手順で実施される。

- (1) 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作成する。
- (2) 100ラウンドの囚人のジレンマゲームをおこない、最終的に得た利得を計算する。
- (3) 同じ手順を100,000回繰り返し、各パラメータごとに得られた利得を分類する。

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刻み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。以下では指名ペア条件、強制ペア条件それぞれの場合について指名・行動を共通して評価する共通型アルゴリズムと、指名・行動を分離して評価する分離型アルゴリズムを用いたシミュレーションの両方をおこない、意思決定アルゴリズムおよび戦略パラメータの違いによってどのように合計利得が変化するかを検証する。

### 3.1 指名ペア条件におけるシミュレーション結果

表2および図3は指名ペア条件において共通型アルゴリズムを用いた場合のシミュレーション結果である。

表2より、全体としては信頼度の初期値  $T_{ij}(0)$  が増加するにつれて平均利得がゆるやかに増加している。ただし、割引率  $r_i = 0$  のときは逆に  $T_{ij}(0)$  の増加に伴って合計利得が急激に減少している。 $r_i = 0$  はすなわち相手の行動に関わらず信頼度を変化させないことを示しており、 $T_{ij}(0)$  の値が対戦を経てもそのまま維持されることを指している。また、 $T_{ij}(0) = 1$  の

表2 共通型アルゴリズムを用いた場合の合計利得（指名ペア条件）

		$T(0)$										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$r$	0	117.5	113.8	109.8	106.8	102.8	99.4	95.6	91.5	87.8	84.1	<u>81.1</u>
	0.1	117.9	123	124.8	122.9	123.5	122.9	121.9	123.1	121.9	124.6	121.3
	0.2	118.2	119.7	121.6	121.8	121.7	124.4	122.5	122.5	124.2	128.8	124.3
	0.3	117.8	118.1	120	121.2	121.4	122.5	123.6	125.5	125.6	128.3	123.4
	0.4	117.6	117.7	120	120.2	122.1	122.8	123.7	125.1	126.8	<u>130.9</u>	123.4
	0.5	117.8	117.1	119.8	120.1	121.3	123.5	123.7	125.7	127.7	130.8	123.5
	0.6	117.6	117.5	118.5	121.1	120.7	123.3	126	126.6	128	129.3	122.3
	0.7	117.9	117.2	119.3	119.6	122.2	122.7	123.2	125.4	127.4	129.3	123
	0.8	117.7	117.9	118.9	120.2	120.9	122.5	124.4	125.6	127.1	129.3	122.5
	0.9	117.5	117.5	118.7	121.1	121.6	121.7	123.6	127	127.4	129.7	122
	1	117.2	117.7	118.6	118.9	119.8	122	123.5	125.1	126.6	129.1	122

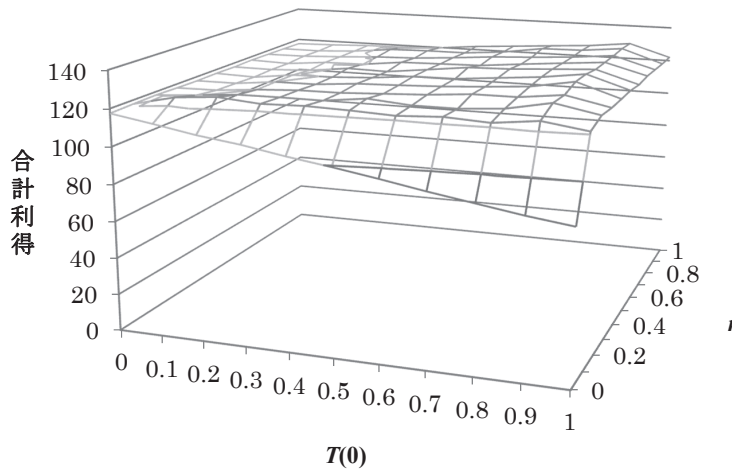


図3 共通型アルゴリズムを用いた場合の合計利得グラフ（指名ペア条件）

ときには  $T_{ij}(0)=0.9$  の時と比べてわずかに減少していることが分かる。 $T_{ij}(0)=1$  の場合、プレイヤーは初めて対戦する相手に対して100%協力を選択することになる。つまり情報のない相手に対して、第1回目の対戦で必ず協力を選択するようなプレイヤーは、10%ほど非協力の可能性を持ったプレイヤーよりも合計利得が低くなるといえる。

$r_i$  の値について見ると、0から増加するにつれて徐々に平均利得が上がっていき、ある程度の値をピークにその後はやや下がっていくことが分かった。利得がピークとなる  $r_i$  の値は0.4~0.7程度の間分布しており、傾向としては  $T_{ij}(0)$  が大きいほど小さい割引率の時点で最大になっている。今回のシミュレーションにおいて最大の利得を獲得したのは  $r_i=0.4$ 、 $T_{ij}(0)=0.9$  のプレイヤーであった。最も利得が低かったのは  $r_i=0$ 、 $T_{ij}(0)=1$  のプレイヤーで、これは相手の行動に関わらず常に協力を選択し続ける戦略をとっている。

次に分離型アルゴリズムを使用した場合のシミュレーション結果について述べる。表3および図4は分離型アルゴリズムを用いた場合の合計利得を示したものである。この時の結果は、共通型アルゴリズムを用いた場合と比べて大きく異なっている。まず全体として合計利得の平均値が大きく増加しており、すべてのパラメータの組み合わせにおいて共通型の場合を上回っている。指名信頼度の初期値  $N_{ij}(0)$ 、行動信頼度の初期値  $A_{ij}(0)$  と合計利得の関係を見ると、 $r_i$  の値が一定の時には信頼度の増加に伴って合計利得も上昇している。共通型の場合では  $T_{ij}(0)=1$  のときに合計利得がわずかに減少していたが、指名・行動を分離して評価する場合は途中で減少することなく  $N_{ij}(0)=1$  ( $A_{ij}(0)=1$ ) に至るまで増加を続けている。

$r_i$  と合計利得の関係については、共通型と同様に  $r_i$  が増加するにつれて平均利得が概ね上

表3 分離型アルゴリズムを用いた場合の合計利得 (指名ペア条件)

		N(0), A(0)										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
r	0	<u>117.7</u>	120.7	125.9	131.9	139.5	146.9	155.7	165.7	173.9	184.3	<u>192</u>
	0.1	126.9	143.8	152.2	160.2	171.7	182.3	193.8	204.9	216.2	229.4	<u>250.7</u>
	0.2	139	153.1	161.9	170.5	181	186.8	197.5	206.9	218.5	227.3	248
	0.3	145.8	159	165.6	174	184.4	190.5	199.1	207.9	215.8	227.9	241.1
	0.4	148.6	162.7	170.8	177	184.1	190.5	201	206.6	214.6	<u>224.3</u>	241.1
	0.5	152.6	167.3	173.6	179.3	186.2	194.2	200.2	206.2	217.9	225.9	236.3
	0.6	155	168.3	172.7	180.8	186.4	193.9	201.9	209.9	216	221.6	233.8
	0.7	156.7	167.2	175.1	180.2	188.6	195.7	202	206.3	217.5	219.6	234.1
	0.8	159.7	172	175.6	183.1	187.9	195.3	203.4	209.7	216.4	223.3	233.9
	0.9	160.5	171.6	175.4	180.3	189.3	196.8	202.7	207.6	215	221.5	226.9
	1	163.8	172.1	178.7	184.3	190.1	194.4	204	208.7	214.1	221	233.8



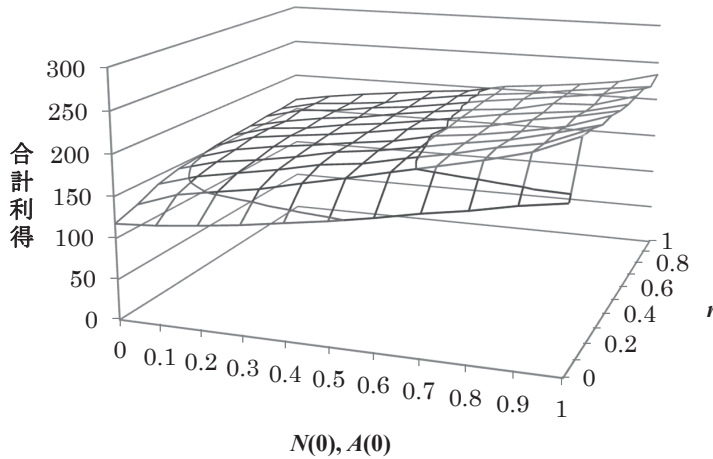


図4 分離型アルゴリズムを用いた場合の合計利得グラフ (指名ペア条件)

昇していくが、特に  $N_{ij}(0)$  が 0 から 0.6 付近までの範囲では  $r_i = 1$  に至るまで増加を続けている。しかし  $N_{ij}(0)$  が 0.7 を超えると  $r_i$  の増加の途中で合計利得が下がりだすようになり、 $N_{ij}(0) = 0.7$  のときには  $r_i = 0.6$  のところで最大となっている。その後  $N_{ij}(0)$  が増加するにつれて利得が最大となる  $r_i$  の値は減少していき、 $N_{ij}(0) = 1$  のときには  $r_i = 0.2$  でピークとなっている。なおこの  $N_{ij}(0) = 1$ 、 $r_i = 0.2$  というパラメータを持つプレイヤーが分離型アルゴリズムを用いた指名ペア条件でのシミュレーションにおいて最大の合計利得を得ており、合計利得が最低となったのは  $r_i$ 、 $N_{ij}(0)$ 、 $A_{ij}(0)$  とともに 0 となる場合のプレイヤーであった。

### 3.2 強制ペア条件におけるシミュレーション結果

ここでは強制ペア条件におけるシミュレーション結果を示す。表4および図5は共通型アルゴリズムを用いた場合の合計利得である。

指名ペア条件のときと同様、基本的には  $T_{ij}(0)$  が増加するにつれて合計利得がゆるやかに上昇するが、 $r_i = 0$  のときのみ  $T_{ij}(0)$  の増加に伴って合計利得が減少する。また、 $T_{ij}(0) = 1$  で  $T_{ij}(0) = 0.9$  の時よりも利得が減少することも共通している。また、合計利得の平均値は指名ペア条件の場合に比べて大きく増加している。最大の利得を獲得したのは  $r_i = 0.7$ 、 $T_{ij}(0) = 0.9$  のプレイヤーであり、最低利得となったのは  $r_i = 0$ 、 $T_{ij}(0) = 1$  のプレイヤーである。

表5および図6は分離型アルゴリズムを用いた場合の合計利得を示したものである。こちらも全体的な傾向は指名ペア条件のときと同様で、共通型アルゴリズムを用いた場合とは反対に  $r_i = 0$  のとき  $N_{ij}(0)$ 、 $A_{ij}(0)$  の値が増加しても合計利得が減少せず増加している。ただし  $r_i = 0$  のときとそれ以外の割引率の場合の利得の差が指名ペア条件の時よりも小さくなっている。指名ペア条件では  $r_i = 0$  のときの合計利得が他の割引率の時に比べて一段低かつ

表 4 共通型アルゴリズムを用いた場合の合計利得 (強制ペア条件)

		$T(0)$										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$r$	0	171.2	166	160.2	153.3	149.2	140.9	134.5	128.5	123.2	117.2	<u>111.5</u>
	0.1	173.7	188.9	190.3	194	196.3	189.8	188.4	190.3	190.4	187.9	187.4
	0.2	172.9	176.2	184.2	185	189.8	192.2	190.8	194.4	197.7	195.8	193.1
	0.3	171.7	174.7	177.5	182.8	185.6	190.9	194	193.2	196.5	201.8	194.1
	0.4	171.8	171.1	176	182	184.9	188.9	191.4	195	201.7	<u>203.8</u>	197.5
	0.5	174.9	167.6	173.3	180.2	184.3	186.9	191	198.3	199	204	197.9
	0.6	172.7	167.2	175.3	179.4	183.2	186.8	192.4	196.6	200.3	205	198.7
	0.7	171.7	166.8	173.9	179.5	184.8	190.1	191.7	194.8	199.9	<u>205.7</u>	200.6
	0.8	172.6	169.7	174.9	180.4	183.4	188.3	194.2	196.6	200.8	201.4	200.8
	0.9	172.6	166.2	172.4	178.8	182.8	186.8	191.3	197.9	198.2	203.1	198.1
1	173.1	169.4	172.2	178.5	183.9	186.2	194.1	195.6	198	203.9	201.2	

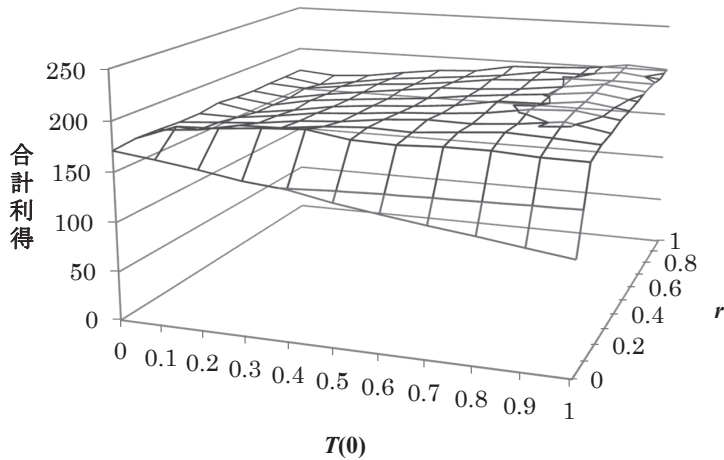


図 5 共通型アルゴリズムを用いた場合の合計利得グラフ (強制ペア条件)

たのに対し、強制ペア条件ではそれほど大きな差は見られず信頼度の上昇に伴ってゆるやかに合計利得が増加している。

合計利得の分布について見ると、共通型アルゴリズムと比較して合計利得の平均値は増加しているが  $r_i$ 、 $N_{ij}(0)$ 、 $A_{ij}(0)$  が小さい場合の利得は減少している。指名ペア条件の場合、割引率や信頼度の初期値が小さい場合の利得も分離型アルゴリズムを使用することで大きく増加しているのに対し、強制ペア条件では概ね  $r_i$  が 0.2 以下かつ  $N_{ij}(0)$  が 0.1 以下の範囲で分離型アルゴリズムを用いた方が合計利得が低くなっており、ペア形成条件による違いが表れた。

表 5 分離型アルゴリズムを用いた場合の合計利得（強制ペア条件）

		$N(0), A(0)$										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$r$	0	132.3	153.2	171.5	189.2	205.9	220.6	234	247	257.4	269.2	276.9
	0.1	154.9	175	193.5	208.1	219.7	234.7	245.8	256	267	274.7	282.2
	0.2	169.2	186.3	200.9	216.8	226.3	237.7	247.6	256	264.7	271.6	278.6
	0.3	178.4	192.6	206.4	221.8	230.6	238	247.2	256	262.7	267.8	275.8
	0.4	183	200.3	209.2	220.4	229.5	239.2	248.7	255.5	261.7	267.8	275
	0.5	189.1	204	211.2	225	234	241.7	248.9	255.3	261.1	267.7	274
	0.6	193.1	206.1	215.2	225.4	234.5	241.7	249.5	254.9	261.1	265.4	272.9
	0.7	193.1	207.4	215.7	226.6	235.7	241	250.6	255.6	261.2	265.6	271.8
	0.8	194.8	207.2	218.3	225	234.6	243.7	246.2	254.4	260.7	265.9	271.2
	0.9	199.9	210.3	218.3	228.9	235.3	242.6	248.3	253.4	258.5	264.6	266.3
	1	199.5	212.9	222.5	230.6	237	243.7	251.8	254.6	259.8	264.6	271.3

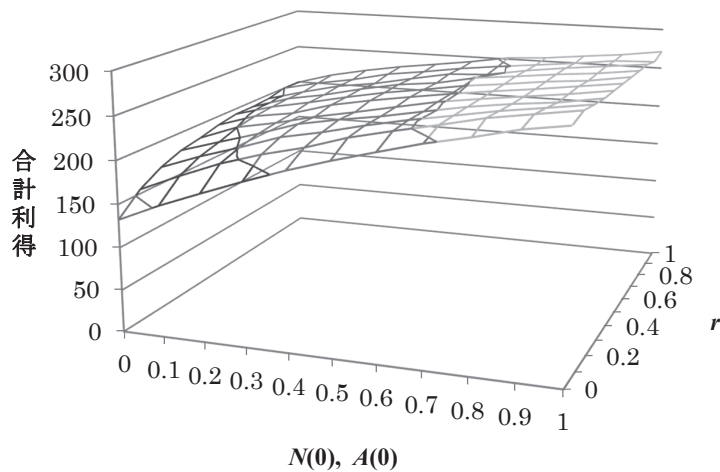


図 6 分離型アルゴリズムを用いた場合の合計利得グラフ（強制ペア条件）

#### 4. 結果の考察

以下にシミュレーション結果についての考察を述べる。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」を導入し、さらに指名・行動で共通の値を用いた時と別々の値を用いた時に得られる利得について分析をおこなった。

まず指名・行動で信頼度を分離して評価した場合、指名ペア条件、強制ペア条件ともに合

計利得の平均値が大きく増加した。これは対戦相手を評価する際に相手が協力的かどうかだけでなく、相手が自分を指名するかどうか重要であるためと考えられる。指名ペア条件では相手の指名がなければペアを形成できないため、指名のための評価値を分離することで効率的な指名が可能となったと考えられるが、相互指名が成立しなくともペアができる強制ペア条件においても利得が増加したことは興味深い。強制ペア条件では相互指名がなくとも対戦は可能であるが、利得を増加させるには協力的な相手を選択し長期にわたる協調関係を築く必要がある。指名・行動の信頼度を分離することでより適切な相手を指名し、相手方も相互の指名が続くように信頼度を増加させることで長期的な関係を維持しやすくなっているものと思われる。また相互指名によるペアが成立しなかった場合も、行動決定に用いる信頼度が別途定義されているため対応しやすくなると考えられる。

利得の分布については、特に割引率  $r_i$  が 0 のときに共通型と分離型で大きく異なる結果となった。 $r_i = 0$  のときには信頼度が変化しないため、指名については他のプレイヤーが全て同じ値であるためランダム選択となり、ゲームの際は同じ行動をとり続けることになる。指名・行動で同じ信頼度を使用する場合、相互指名によるペアが成立しにくいことから評価を下げられやすく、そのため協力的な関係を維持できず、また行動が変化しないことから非協力的な相手に搾取されやすいものと思われる。分離型の信頼度を使用する場合は相互指名が成立せず指名信頼度を下げられても行動信頼度には影響しないため、協力的に振る舞うプレイヤーは対戦時に相互協力を得やすく、最終的に利得が増加する。

指名ペア条件と強制ペア条件で比較した場合、共通型のアルゴリズムでは利得分布の形には共通性が多いが、分離型のアルゴリズムでは大きな違いがあった。強制ペア条件において信頼度が比較的大きく割引率が小さい領域においては分離型の方が利得の落ち込みが少なく、対して信頼度・割引率ともに小さい領域では分離型の方が利得が落ち込む現象が見られた。これは分離型アルゴリズムにおいて行動が指名とは別に評価されているため、対戦当初の協力率が全体に影響しやすく、かつ割引率が小さいために迅速に非協力的な相手に報復することがないためと考えられる。

## 5. ま と め

本研究ではネットワーク環境下でのゲームにおける戦略について、ネットワーク型囚人のジレンマモデルを用いたシミュレーションをおこない、戦略の持つ特性を分析した。プレイヤーの意思決定における相手の選択・指名および行動決定について、共通の評価値を用いておこなう場合とそれぞれを分離した評価値を使用するアルゴリズムを構築し、どのような違いがあるかを検証した。過去に行った被験者実験とシミュレーションにより、指名ペア条件で

は経験を積むことで共通型から分離型へ変化すること、強制ペア条件では共通型を使い続けていることが示唆されている。

シミュレーションの結果より、分離型のアルゴリズムを用いた方が共通型よりも多くの利得を平均的に得られることが分かった。また、割引率が低くあまり行動を変化させないプレイヤーであっても分離型の戦略を採用することで利益の落ち込みを回避できることが示された。指名ペア条件での利得はペア形成の難しさから小さくなる傾向にあるので、自分の利得をより増加させるために分離型への戦略変化がおこったものと考えられる。

以上より、基本的に同じ構造を持つ信頼度という評価値を相手指名と行動選択で共通とした場合および分離した場合で、各プレイヤーが得られる利得の特性が大きく変化することが示された。これらはプレイヤーが持つ初期信頼度や割引率といった固有パラメータと使用する意思決定アルゴリズムの組み合わせが最終的な結果に大きく影響していることに加えて、被験者実験における戦略のシフトの原因を示すものでもある。

今回のシミュレーションでは強制ペア条件においても分離型のアルゴリズムで利得が増加することが示されたが、被験者実験では共通型でもある程度の利得を得られるためか戦略のシフトは起こっていない。今後は意思決定アルゴリズムがどのような条件で変更されるのかなど、より被験者の行動を理解・再現できるような意思決定手法の開発と分析を進めていきたいと考えている。

## 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 reciprocity 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] 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.
- [11] 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.