

卒業論文 2021 年度 (令和 3 年)

「商取引ゲーム」をベースにした  
計算可能な複雑系としての社会契約

慶應義塾大学 環境情報学部  
宮元 眺

「商取引ゲーム」をベースにした  
計算可能な複雑系としての社会契約

社会契約とは、ある集団において、「各成員に合意された約束の履行を強制する力」を生じさせるプロセスである。この力がどのようにして生じるのかについては、交渉ゲーム理論や進化ゲーム理論を用いて研究されきた (Verbeek Bruno Christopher 2020)[1] が、大半の研究は、そのゲームにおける利得の分配を強制執行する力の存在が暗黙的に仮定されている。この強制執行力が集団の外部に存在することを仮定する場合、それは別の社会契約が成立していることを意味するため、社会契約を完全に説明することはできない。逆に、外部に強制執行力の存在を仮定しない場合、過去の歴史とそこから決定される社会指標を用いることで社会契約は成立するとされている (Binmore 2005)。しかしながら、その研究では内部的に強制執行力を生じさせるメカニズムについては還元主義的にしか説明されておらず、その強制執行力を生じさせる成員の振る舞いを明確に記述することはできなかった。本研究では、まず、外部の強制執行力として、「各成員から報告された約束の結果 (歴史) を記録し、それに基づいて各成員の評判 (社会指標) を決定するシステム」の存在を仮定し、そのシステムが各成員に合意された約束の履行を強制する条件について考えた。次に、そのシステムを、ビザンチン将軍問題の署名付きの解法を用い、各成員の振る舞いによって自己組織化された分散システムとして設計した。この分散システムを、マルチエージェントシミュレーションを用いて検証した結果、成員の構成によっては、一部の成員が想定されない振る舞いを行った場合でも、最終的に合意された約束が必ず履行される状況を作り出せることがわかった。これにより、外部の強制執行力が存在しない場合でも、成員の構成次第で社会契約が成立することを示せ、社会契約の成立に必要な歴史の定義や社会指標の計算方法、各成員の振る舞いを計算可能なレベルで明確に定義することができた。もし将来、コンピューターを用いた人々の社会契約が必要とされる時が来るならば、今回の研究がその実現に何らかの形で貢献することを願う。

キーワード:

1. 社会契約, 2. 複雑系, 3. マルチエージェントシミュレーション, 4.

慶應義塾大学 環境情報学部  
宮元 眺

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>5</b>
1.1 本研究の動機	5
1.2 本研究の貢献	6
1.3 本論の構成	6
<b>第 2 章 背景</b>	<b>7</b>
2.1 社会契約とは	7
2.2 スタグハントゲーム	7
2.3 これまでの社会契約の議論	7
2.4 フォーク定理	7
2.5 強制執行力	7
2.6 外部の強制執行力	8
2.7 限定合理性	8
2.8 複雑系	8
2.9 自己組織化	8
2.10 ビザンチン将軍問題	8
2.11 署名されたメッセージによる解決策	8
2.11.1 仮定	9
2.11.2 関数 $choice(V)$	9
2.11.3 アルゴリズム $SM(m)$	9
2.12 マルチエージェントシミュレーション	9
<b>第 3 章 問題提起</b>	<b>10</b>
3.1 本論の問題提起	10
3.2 問題解決の要件	10
3.2.1 歴史を定義する	10
3.2.2 社会指標の計算方法を定義する	10
3.2.3 成員の振る舞いのみで記述できる	10
<b>第 4 章 仮説と検証方法</b>	<b>11</b>
4.1 本論の仮説	11
4.2 仮説の検証方法	11
<b>第 5 章 商取引ゲーム</b>	<b>13</b>
5.1 本章の問題提起	13
5.2 本章の仮説	13
5.3 提案手法	13
5.3.1 社会指標	13

---

5.3.2	歴史	13
5.3.3	商取引システム	13
5.3.4	観察不可	13
5.4	商取引ゲーム	13
5.4.1	ゲームの進め方	14
5.4.2	ゲーム木	14
5.4.3	非協力戦略型ゲーム	15
5.5	証明	15
5.5.1	前提の整理	15
5.5.2	不正行為が起きない戦略組とその条件	16
5.5.3	命題	16
5.5.4	証明	16
5.6	結論	20
<b>第 6 章</b>	<b>倫理ある商取引ゲーム</b>	<b>21</b>
6.1	本章における問題提起	21
6.2	本章の仮説	21
6.3	提案手法	21
6.3.1	倫理ある商取引ゲーム	21
6.3.2	誠実な戦略をとった割合と成功が報告される割合の関係	22
6.4	「倫理ある商取引ゲーム」において不正が防止される条件	22
6.4.1	不正が抑制される戦略組と期待利得の不等式	22
6.4.2	<i>seller</i> と <i>buyer</i> の期待利得	22
6.4.3	<i>seller</i> が誠実な戦略をとる条件	23
6.4.4	<i>buyer</i> が誠実な戦略をとる条件	23
6.4.5	信頼度 $p^{player}$	23
6.4.6	最低信頼度 $T^{player}$	24
6.4.7	最低信頼度を用いた条件	24
6.5	実験方法	24
6.5.1	エージェントの種類	24
6.5.2	試行	25
6.6	「商取引システム」の詳細	26
6.6.1	ReputationWeight	26
6.6.2	「成功」が報告された場合の通貨保有量の変化	26
6.6.3	EscrowCost	26
6.6.4	EscrowCost の負担比率	26
6.6.5	EscrowCost の分配	27
6.7	評価	27
6.8	結論	27
<b>第 7 章</b>	<b>複雑系としての社会契約</b>	<b>30</b>
7.1	本章の問題提起	30
7.2	本章の仮説	30
7.3	提案手法	30

7.3.1	成員の振る舞い . . . . .	30
7.3.2	時刻 $t$ における成員の振る舞い . . . . .	31
7.4	実験方法 . . . . .	31
7.4.1	実験用の商取引契約 . . . . .	31
7.4.2	step6 の検証 . . . . .	32
7.4.3	エージェントの種類 . . . . .	32
7.4.4	試行 . . . . .	32
7.5	評価 . . . . .	33
<b>第 8 章</b>	<b>結論</b>	<b>35</b>
8.1	本論のまとめ . . . . .	35
8.2	本論の課題 . . . . .	35
8.3	今後の研究 . . . . .	35

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の動機

社会契約とは、ある集団において、その成員達に合意された約束を遵守させる強制力が生じるプロセスである。中世において、社会契約はホッブズやロック、ルソーによって議論され、なぜ国家において国民が法に従うのかを論理的に説明しようと試みることで王権神授説を否定する主張として注目された。現代においては、ロールズやハースニーが中世の社会契約論の一般化を試み、その社会契約のプロセスの果に導きだされる公正な正義とはどういったものかを議論した。それ以降、社会契約は倫理や正義論といった概念と結びつけて考えられることが多くなった。

このように社会契約が研究される意義は、社会の変化とともに移り変わっている。今後も社会の様々な変化に伴って社会契約の研究意義は変化していくだろう。その中でも、インターネットの普及がもたらす社会の変化は、社会契約の研究に新たな意義を与えていると考えている。

2020年のGSMA[2]の調査では、モバイル回線のユニークな契約者数は5.8億人に登り、実に世界人口の70%がモバイル回線を所有していることが示唆されている。インターネットユーザーが全世界で増加する一方、Google[3]やFacebook[4]のように全世界にユーザーをかかえるまで成長するサービスが現れ、そうしたサービスの運営会社も多国籍企業として多数の国に支社を置くようになっている。こうした企業のガバナンスは、もはや一国の法にのみ依存するものではなくなっている。

また、誰にも送金を止めさせないことを目的としたBitcoin[5]の登場を皮切りに、ブロックチェーンを用いた様々な分散型台帳技術を用いたサービスが出現している。こうしたシステムはP2Pと呼ばれる通信技術を用いており、世界中のコンピューターがそのノードとしてシステムの運用を担っていたため、単一の国家がそのサービスを規制するのは極めて困難である。

こうしたインターネット上のサービスのグローバル化や新技術の登場により、インターネットを国家という枠組みを超越した社会インフラへ進化していると言えるだろう。こうした進化の先に、「地球規模OS」[6]のような地球規模で資源を抽象化して共有可能にするシステムが当たり前存在する未来が到来すると期待される。

そうした未来の実現に向かって必ず衝突する問題は、国家を超越したインターネット上に存在するサービスの正当性をどのように保証するかという問題である。先に述べたとおり、一国の法による拘束力では、サービスの運営母体を規制することは困難である。Bitcoinブロックチェーンにおいては、Proof of Workと呼ばれる技術によって、確率的にその正当性を保証しようとしているが、そのためだけに世界中で大量の計算リソースが消費され続けている。これが国家を超越した社会インフラを維持するベストな方法だとは安易に納得したくない。

我々はこの問題を解決する糸口は社会契約の理論研究にあると考えている。かつて中世の社会契約論者が説明したように、国家の法が国民の社会契約によって成立するのであれば、国家を超越したインターネット上の法はインターネットユーザーによる社会契約によって成立するのではないだろうか。仮に国家を超越したインターネット上の法が成立するのならば、それによってサービスの正当性を保証すればよい。こうしたアイディアが本研究のモチベーションである。

## 1.2 本研究の貢献

本研究では、インターネットユーザーの集団を想定して社会契約の理論を再構築する。当然のごとく、彼らはコンピュータを用いてインターネットでやり取りをするため、社会契約のモデルは (コンピュータで) 計算可能なレベルまで抽象化する。それにあたって課題となるのは、強制執行力である。これまでの研究において、この強制執行力の存在は暗黙的に存在が仮定されているか、外部の強制執行力としてその存在が仮定されているかのいずれかであった。Binmore の研究では、この外部の強制執行力が存在しない場合についても社会契約が成立することが示されている [7] が、その説明は還元主義的なものであり、具体的に成員のどのような振る舞いによってそれがなし得るのか記述することはできなかった。本研究では、この内部的に強制執行力が生じるメカニズムを成員の振る舞いとして具体的に記述を可能にする。これにより、社会契約の全体を計算可能なレベルでのモデリングすることが可能となる。また、コンピュータシミュレーションを用いて、そのモデルを検証することで、ある集団における成員の性質と社会契約の成立の関係性を明らかにする。

## 1.3 本論の構成

## 第2章 背景

### 2.1 社会契約とは

社会契約とは、ある集団において、「各成員に合意された約束の履行を強制する力」を生じさせるプロセスである。

### 2.2 スタグハントゲーム

		$hunter_2$	
		鹿	野兎
$hunter_1$	鹿	(2,2)	(0,1)
	野兎	(1,0)	(1,1)

表 2.1: スタグハントゲームの利得表

スタグハントゲームとは、ルソーの「人類不平等起源論」[8]に登場する「鹿狩りの寓話」をモデリングした非協力戦略型ゲームである。[9] 二人のハンターが協力して鹿を狩るか、相手を裏切って野兎を狩るかを選択するが、鹿は二人で協力しなければ狩ることができず、1人だけで狩ろうとすると何も得ることができない。このゲームは代表的な囚人のジレンマゲームであり、

### 2.3 これまでの社会契約の議論

デイビッド・ヒュームは

### 2.4 フォーク定理

無限回の繰り返し囚人のジレンマゲームにおいて、協力解が均衡解になるという定理。

### 2.5 強制執行力

強制執行力とは、合意された利得の分配を強制的に執り行っている力である。先に紹介したスタグハントゲームでいうところの、二人で協力して鹿を狩った場合にその鹿を二人で分け合うという取り決めを守らせている力である。これまでの社会契約の議論では、こうした強制執行力の存在が暗黙的に仮定されていた。一例としては、ロールズの「自然の義務」、ハーサニの「道徳的コミットメント」が挙げられる。



## 2.6 外部の強制執行力

強制執行力のうち、集団の外部の機関によってもたらされる力を外部の強制執行力と呼ぶ。外部の強制執行力が存在する場合、そこには別の社会契約が存在していることになる。そのため、社会契約によって  $x$  相互監視によって成り立つとされている。

## 2.7 限定合理性

限定合理性とは、意思決定主体が認知能力の限界によって限定された合理性しか発揮することができない性質である。ゲーム理論においても、「合理的で利己的な経済人」という仮定の上では説明が困難だった実社会での協力的な行動の説明に用いられている。最後通牒ゲームの実験は、その最もたる例であり、実社会のプレイヤーは相手よりも少ない取り分を提示されると自身の利得が 0 になるにも関わらず報復的な戦略を選んでいった。[10]

## 2.8 複雑系

システムの構成要素の振る舞いによって全体の本論においては、社会契約を成立させようとする集団を、成員によって構成される複雑系として捉える。

## 2.9 自己組織化

自己組織化とは、複雑系において、システム全体を俯瞰できない構成要素の振る舞いによって、全体として秩序だった振る舞いがなされることである。本論においては、3 つ目の検証で、外部に存在を仮定して強制執行力を用いる。

## 2.10 ビザンチン将軍問題

ビザンチン将軍問題とは、～である。[11]

IC1. すべての誠実な副官は同じ司令に従う。

IC2. 司令官が誠実な場合、全ての誠実な副官は彼の送った司令に従う。

## 2.11 署名されたメッセージによる解決策

A1～A5 の 5 つの仮定の上で、下記のアлゴリズムによって、 $m + 1$  人以上の将軍がいる場合に IC1 と IC2 が満たされる。

### 2.11.1 仮定

- A1 送信されたすべてのメッセージは正しく到達する
- A2 メッセージの受信者は誰が送信したのかわかる
- A3 メッセージが届かないことを検知できる
- A4 誠実な将軍の署名は偽造できず、署名されたメッセージの内容が変更されても、それを検知することができる。
- A5 誰でも将軍の署名の信憑性を検証することができる。

### 2.11.2 関数 $choice(V)$

### 2.11.3 アルゴリズム $SM(m)$

1.  $V_i = \emptyset$  として初期化する。( $\emptyset$  は空集合)
2. 司令官は彼の値を全ての副官に署名して送る。
3. 各  $i$  について、
  - (a) もし  $lieutenant_i$  が  $v : 0$  という形式のメッセージを受け取り、まだ何の命令も受けていない場合は、
    - i.  $lieutenant_i$  は  $V_i$  を  $v$  にする。
    - ii.  $lieutenant_i$  は他のすべての中尉にメッセージ  $v : 0 : i$  を送ります。
  - (b) もし  $lieutenant_i$  が  $v : 0 : j_1 : \dots : j_k$  という形式のメッセージを受け取り、 $v$  が集合  $V_i$  に入っていない場合は
    - i.  $lieutenant_i$  は  $v$  を  $V_i$  に追加する。
    - ii. もし  $k < m$  であれば、 $lieutenant_i$  は  $j_1, \dots, j_k$  以外のすべての副官に  $v : 0 : j_1 : \dots : j_k : i$  というメッセージを送る。
4. 各  $i$  について。  $lieutenant_i$  がこれ以上メッセージを受け取らない場合、 $lieutenant_i$  は命令  $choice(V_i)$  に従う。

## 2.12 マルチエージェントシミュレーション

マルチエージェントシミュレーションとは、与えられた方策に従って振る舞う複数のエージェントと環境を定義し、計算機によってそれらのエージェントの振る舞いをシミュレーションすることで、エージェント達の振る舞いによってもたらされる相互作用を観察する研究手法である。本論では、分散システムとして設計されたシステムの検証のために用いる。

## 第3章 問題提起

### 3.1 本論の問題提起

これまでのゲーム理論を用いて社会契約のメカニズムを説明しようとする研究では、強制執行力の存在が仮定されている、もしくは外部の強制執行力の存在が仮定されている上で議論が進められていた。外部の強制執行力が存在している場合については、別の社会契約が成立している必要があるため、その別の社会契約が成立しているメカニズムを説明する必要性が生じ問題が堂々巡りに陥る。一方、外部の強制執行力が存在しない場合については、社会の過去の歴史が決定する社会指標を利用することで社会契約が成立するとされている (Binmore 2005[7]) が、この研究は還元主義的であり具体的に成員達がどのような振る舞いをするので、そうした歴史が決定されどのように社会指標を導き出すのかを決定することは困難であった。

そこで本研究では、改めて外部の強制執行力が存在しない場合について、合意された約束を成員達に遵守させることが可能なのかという問題に取り組み、成員達のどのような振る舞いによって、歴史を決定し、社会指標を導き出せばよいのかを計算可能なレベルで明確にする。

### 3.2 問題解決の要件

先の問題が解決されるためには、成員達が合意された約束を遵守する状態を作り出せていることを示す他に、下記の3つの要件が満たされている必要がある。

#### 3.2.1 歴史を定義する

第1に、社会契約の成立のために必要な歴史とはいかなるものかを定義する必要がある。これは社会指標を計算するために各成員が記録すべき過去のある集団の何らかの状態である。

#### 3.2.2 社会指標の計算方法を定義する

第2に、歴史から社会指標を計算する方法を定義する必要がある。[?] 合意された約束が遵守されるようにするため、この社会指標は約束を履行する成員の社会指標が上がり、約束を保護にする成員の社会指標が下がるように設計する必要がある。

#### 3.2.3 成員の振る舞いのみで記述できる

第3に、各成員の振る舞いによってのみ、歴史が共有されて各成員の社会指標を計算でき、その振る舞いを記述可能である必要がある。これは外部の強制執行力が存在しない場合、あらゆる歴史も計算された社会指標も、その正当性を保証した状態で外部に記録共有することができないためである。

## 第4章 仮説と検証方法

### 4.1 本論の仮説

外部の強制執行力が存在しない場合であっても、集団を構成する成員の性質によっては強制執行力を生み出すことが可能であり、それによって成員たちに合意した約束を遵守させることが可能である。

### 4.2 仮説の検証方法

本論では、3つの補題の仮説検証を行うことで、先の仮説を示す。

第1に、全ての成員が完全に合理的である場合、成員の振る舞いによって決定された歴史から各成員の社会指標を算出できる外部の強制執行力が、成員達に約束を遵守させるようなインセンティブ設計をできないことを示す。私達は、この検証のために、任意の約束を商取引契約として結ぶ売り手と買い手の商取引について考える。具体的には、売り手が報告した商取引の結果を歴史として記録し、各成員の社会指標である通貨保有量を決定することができる外部の強制執行力としての「商取引システム」の存在を仮定する。また、この「商取引システム」を用いて行われる商取引を「商取引ゲーム」という非協力戦略型ゲームとしてモデリングする。そして、買い手と売り手の各戦略の利得を比較することで、全ての成員が合理的である場合に「商取引システム」から報告された商取引の結果に基づいて不正が防止されるような買い手と売り手の通貨保有量を決定することが不可能であることを示す。

第2に、一部あるいは全部の成員が限定合理的である場合、成員の振る舞いによって決定された歴史から各成員の社会指標を算出できる外部の強制執行力が、合理的な成員達に約束を遵守させるようなインセンティブ設計をできることを示す。この検証のために、我々は先の「商取引ゲーム」において報復的な戦略(買い手が商取引契約を履行しなかった場合に「失敗」を報告する戦略)をとる成員のみによって行われる「倫理ある商取引ゲーム」について考える。はじめの検証と同じように、この「倫理ある商取引ゲーム」における買い手と売り手の各戦略の利得を比較することで、このモデルにおいては「商取引システム」から報告された商取引の結果に基づいて不正を防止できるような買い手と売り手の通貨保有量を決定することが可能であることを示す。また、この条件に基づいて各誠意の通貨保有量を操作する商取引システムを設計し、本来の「商取引ゲーム」に適用してマルチエージェントシミュレーションを用いた実験を行うことで、全ての成員が先に述べた報復的な戦略を取る場合でなくても、一部あるいは全部の成員が報復的な戦略をとっていれば、不正が防止されうることを示す。

第3に、外部の強制執行力が存在しない場合でも、一部あるいは全部の成員が限定合理的である場合、各成員の振る舞いのみによって成員達に約束を遵守させる強制執行力を生じさせることが可能であることを示す。この検証のために、我々は先の検証で外部の執行力として存在が仮定されていた「商取引システム」を集団が構成する複雑系の中で各誠意の振る舞いによって自己組織化されたシステムとして設計し、第2の検証と同様の実験を行う。「商取引システム」を各成員の振る舞いによって自己組織化されたシステムとして再現することができ、一部あるいは全部の成員が報復的な戦略をとっていれば、不正が防止されうることを示す。

これら 3 つの補題の検証により、外部の強制執行力が存在しない場合であっても、集団を構成する成員の性質によっては強制執行力を生み出すことが可能であり、それによって成員たちに合意した約束を遵守させることが可能だとわかる。また、問題提起の要件で述べた社会契約の成立に必要な歴史の定義や社会指標の計算方法、具体的な成員の振る舞いがそれぞれ明確になる、

## 第5章 商取引ゲーム

本章では、外部の強制執行力によって商取引契約の履行が保証されない商取引を「商取引ゲーム」としてモデリングし、合理的な集団を仮定した場合に、そのゲームにおいて不正が生じないようなインセンティブを設計が不可能なことを示す。

外部の強制執行力が存在すると仮定した上で、歴史と社会指標の計算方法を定義することで、社会契約が成立するかを確かめるため、

### 5.1 本章の問題提起

通貨を社会指標ととらえ、商取引の結果を合理的な人々が商取引を成功させるようなインセンティブ設計ができるか？

仮にそれをなし得る外部の強制力が存在していたとして、1章の初めに述べたように、その存在というのは堂々巡りになっていく。警察も、裁判所も、税金を支払うことによって受けているサービスという点で、商取引だと考えれば、この商取引の依存関係を紐解いたさきに、必ず1つは他の商取引に依存せずとも、契約が履行される商取引が存在しているはずである。果たしてそんな商取引のメカニズムはデザイン可能なのか？

### 5.2 本章の仮説

### 5.3 提案手法

#### 5.3.1 社会指標

#### 5.3.2 歴史

#### 5.3.3 商取引システム

#### 5.3.4 観察不可

### 5.4 商取引ゲーム

また、この「商取引システム」において、商取引で不正行為を防止できるインセンティブ設計を行うことができるのかを検証するために、このシステムを商取引の仲介として用いる「商取引ゲーム」を次のように定義する。なお、ここでのゲームの *players*(システムの参加者達) は合理的に (期待利得の最も高い) 戦略を決定するものとする。

### 5.4.1 ゲームの進め方

本稿での商取引は、以下の 4 つのステップで *seller* と *buyer* が交互に行動を展開するものとする。

**step1** *seller* は商品 *goods* とその価格を告知する

**step2** その商品の購入を希望する *buyer* が「商取引システム」に商取引の合意を報告する。

**step3** *seller* は「正当な行為」と「不正な行為」のどちらかの行動選択をする。ここで「正当な行為」を行った場合、*buyer* は契約通りの *goods* を受け取れ、「不正な行為」を行った場合、*buyer* は契約通りの *goods* を受け取れないものとする。

**step4** *buyer* は商取引の「成功」か「失敗」かを「商取引システム」に報告する。この報告に基づき、「商取引システム」は *seller* と *buyer* の保有する通貨の量を調整する。

### 5.4.2 ゲーム木

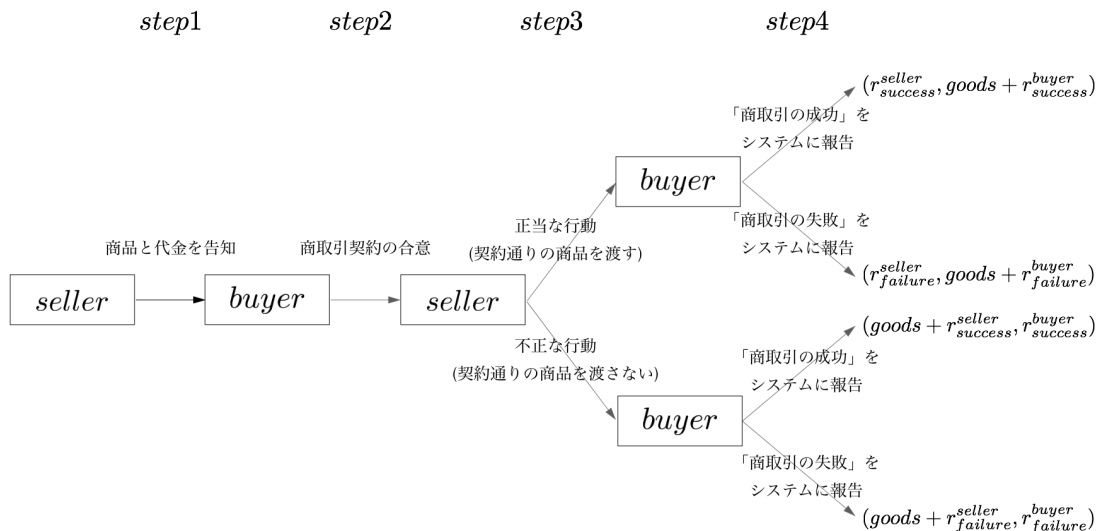


図 5.1: 「商取引ゲーム」のゲーム木

先の商取引ゲームをゲームの木を用いて表すと図 5.1 のようになる。step1 と step2 の時点では商取引の結果が変化することはない、step3 で *seller* が「正当な行為」をとるか否かと、step4 での *buyer* からの報告によってのみ商取引の結果は変化する。また、「商取引システム」からは「行動観察不可の条件」より *seller* と *buyer* がどの行動をとったかはわからないため、step4 での *buyer* の報告にのみ基づいて *seller* と *buyer* の保有する通貨の量を調整しなければならない。つまりは商取引の結果①と③、②と④はそれぞれ *goods* を除く利得は同じでなくてはならない。

		<i>buyer</i>			
		$s_1^{buyer}$	$s_2^{buyer}$	$s_3^{buyer}$	$s_4^{buyer}$
<i>seller</i>	$s_1^{seller}$	$(r_{success}^{seller},$ $goods + r_{success}^{buyer})$	$(r_{success}^{seller},$ $goods + r_{success}^{buyer})$	$(r_{failure}^{seller},$ $goods + r_{failure}^{buyer})$	$(r_{failure}^{seller},$ $goods + r_{failure}^{buyer})$
	$s_2^{seller}$	$(goods + r_{failure}^{seller},$ $r_{failure}^{buyer})$	$(goods + r_{success}^{seller},$ $r_{success}^{buyer})$	$(goods + r_{failure}^{seller},$ $r_{failure}^{buyer})$	$(goods + r_{success}^{seller},$ $r_{success}^{buyer})$

表 5.1: 非協力戦略型ゲームとして表した「商取引ゲーム」の利得表

### 5.4.3 非協力戦略型ゲーム

また、この商取引のモデルは、第 3 ステップ以降の *seller* の行動選択と、それに対する第 4 ステップの *buyer* の行動選択を、非協力戦略型ゲームとしてとらえられる。ここで、戦略  $s_n^{player}$  を *player* (ここでは *seller* か *buyer*) の取りうる戦略番号  $n$  の戦略として、*seller* と *buyer* のそれぞれの戦略は以下のように定義する。

$s_1^{seller}$  ... 正当な行為を行う

$s_2^{seller}$  ... 不正な行為を行う

$s_1^{buyer}$  ... *seller* が正当な行為をとった場合は「成功」を、不正な行動をとった場合は「失敗」を報告する

$s_2^{buyer}$  ... *seller* が正当な行為をとった場合は「成功」を、不正な行動をとった場合は「成功」を報告する

$s_3^{buyer}$  ... *seller* が正当な行為をとった場合は「失敗」を、不正な行動をとった場合は「失敗」を報告する

$s_4^{buyer}$  ... *seller* が正当な行為をとった場合は「失敗」を、不正な行動をとった場合は「成功」を報告する

また、商取引終了時の *player* の保有する通貨量の変化によって生じる利得を、第 4 ステップでの報告が「成功」だった場合は  $r_{success}^{player}$ 、「失敗」だった場合は  $r_{failure}^{player}$  とし、商品の所有によって生じる利得を *goods* と表す。ここで、*seller* と *buyer* の任意の戦略組  $(s_n^{seller}, s_n^{buyer})$  の際の *seller* と *buyer* の各利得は表 5.1 のようになる。

## 5.5 証明

### 5.5.1 前提の整理

- システムは *buyer* によって報告された商取引の結果を観察できる。
- システムは *seller* と *buyer* がどの戦略を選んだかはわからない。
- 商取引に参加する *player* は合理的に (利得の期待値が最も高い) 戦略を決定する。
- システム内には追跡可能な通貨が存在しており、商取引にはその通貨が用いられる。
- システムからは *player* の通貨の保有量を操作することができる。



### 5.5.2 不正行為が起きない戦略組とその条件

表より、商取引で不正行為が起きないためには、*seller* と *buyer* のとる戦略組が  $(s_1^{seller}, s_1^{buyer})$  もしくは  $(s_1^{seller}, s_2^{buyer})$  のいずれかに帰着しなければならない。

ここで *player* が戦略  $s_n^{player}$  をとったときの利得  $R$  の期待値を  $E(R|s_n^{player})$  とする。

$(s_1^{seller}, s_1^{buyer})$  に帰着するためには、

$$E(R|s_1^{seller}) > E(R|s_2^{seller}) \text{ かつ } E(R|s_1^{buyer}) > E(R|s_2^{buyer}) \text{ かつ } E(R|s_1^{buyer}) > E(R|s_3^{buyer}) \text{ かつ } E(R|s_1^{buyer}) > E(R|s_4^{buyer}) \dots \text{条件①}$$

を満たす必要があり、 $(s_1^{seller}, s_2^{buyer})$  に帰着する場合は、

$$E(R|s_1^{seller}) > E(R|s_2^{seller}) \text{ かつ } E(R|s_2^{buyer}) > E(R|s_1^{buyer}) \text{ かつ } E(R|s_2^{buyer}) > E(R|s_3^{buyer}) \text{ かつ } E(R|s_2^{buyer}) > E(R|s_4^{buyer}) \dots \text{条件②}$$

を満たす必要がある。

つまり、不正行為を防ぐ商取引のインセンティブ設計を行うためには、条件①もしくは条件②を満たす  $(r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer})$  の組を「商取引システム」から決定することができなければならない。そこで、不正行為を防ぐ商取引のインセンティブ設計が不可能であることを示すために、次の命題を証明する。

### 5.5.3 命題

条件①もしくは条件②のいずれかの条件を満たす  $(r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer})$  の組を商取引システムから決定することはできない。

### 5.5.4 証明

*player* が戦略  $s_n^{player}$  をとる確率を  $p_n^{player}$  と表す。 ( $0 \leq p_n^{player} \leq 1$ )

*seller* について、各戦略の期待利得は以下のように表せる。

$$E(R|s_1^{seller}) = p_1^{buyer} r_{success}^{seller} + p_2^{buyer} r_{success}^{seller} + p_3^{buyer} r_{failure}^{seller} + p_4^{buyer} r_{failure}^{seller}$$

$$E(R|s_2^{seller}) = p_1^{buyer} (goods + r_{failure}^{seller}) + p_2^{buyer} (goods + r_{success}^{seller}) + p_3^{buyer} (goods + r_{failure}^{seller}) + p_4^{buyer} (goods + r_{success}^{seller})$$

$$= goods + p_1^{buyer} r_{failure}^{seller} + p_2^{buyer} r_{success}^{seller} + p_3^{buyer} r_{failure}^{seller} + p_4^{buyer} r_{success}^{seller}$$

ここで、 $E(R|s_1^{seller}) > E(R|s_2^{seller})$  を満たすためには、

$$p_1^{buyer} r_{success}^{seller} + p_2^{buyer} r_{success}^{seller} + p_3^{buyer} r_{failure}^{seller} + p_4^{buyer} r_{failure}^{seller}$$

$$> goods + p_1^{buyer} r_{failure}^{seller} + p_2^{buyer} r_{success}^{seller} + p_3^{buyer} r_{failure}^{seller} + p_4^{buyer} r_{success}^{seller}$$

$$\therefore p_1^{buyer} r_{success}^{seller} + p_4^{buyer} r_{failure}^{seller} > goods + p_1^{buyer} r_{failure}^{seller} + p_4^{buyer} r_{success}^{seller}$$

$$\therefore p_1^{buyer} r_{success}^{seller} + p_4^{buyer} r_{failure}^{seller} - goods + p_1^{buyer} r_{failure}^{seller} - p_4^{buyer} r_{success}^{seller} > 0$$

$$\therefore p_1^{buyer} (r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller}) - p_4^{buyer} (r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller}) - goods > 0$$

$$\therefore (p_1^{buyer} - p_4^{buyer}) (r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller}) - goods > 0$$

$$\therefore (p_1^{buyer} - p_4^{buyer}) (r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} - \frac{goods}{p_1^{buyer} - p_4^{buyer}}) > 0$$

を満たす必要がある。つまり,

$$p_1^{buyer} > p_4^{buyer} \text{ のときは,}$$

$$r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} > \frac{goods}{p_1^{buyer} - p_4^{buyer}}$$

$$p_1^{buyer} < p_4^{buyer} \text{ のときは,}$$

$$r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} < \frac{goods}{p_1^{buyer} - p_4^{buyer}}$$

を満たせば,  $E(R|s_1^{seller}) > E(R|s_2^{seller})$  である。なお,  $p_1^{buyer} = p_4^{buyer}$  のときは,

$E(R|s_1^{seller}) > E(R|s_2^{seller})$  は成り立たない。

また, *buyer* について, 各戦略の期待利得は以下のように表せる。

$$E(R|s_1^{buyer}) = p_1^{seller} (goods + r_{success}^{buyer}) + p_2^{seller} r_{failure}^{buyer}$$

$$E(R|s_2^{buyer}) = p_1^{seller} (goods + r_{success}^{buyer}) + p_2^{seller} r_{success}^{buyer}$$

$$E(R|s_3^{buyer}) = p_1^{seller} (goods + r_{failure}^{buyer}) + p_2^{seller} r_{failure}^{buyer}$$

$$E(R|s_4^{buyer}) = p_1^{seller} (goods + r_{failure}^{buyer}) + p_2^{seller} r_{success}^{buyer}$$

### 条件①が成り立たないことの証明

ここで, 条件①の必要条件である  $E(R|s_1^{buyer}) > E(R|s_2^{buyer})$  かつ  $E(R|s_1^{buyer}) > E(R|s_3^{buyer})$  かつ  $E(R|s_1^{buyer}) > E(R|s_4^{buyer})$  を満たすためには,

$$E(R|s_1^{buyer}) > E(R|s_2^{buyer})$$

$$\therefore p_1^{seller} (goods + r_{success}^{buyer}) + p_2^{seller} r_{failure}^{buyer} > p_1^{seller} (goods + r_{success}^{buyer}) + p_2^{seller} r_{success}^{buyer}$$

$$\therefore p_2^{\text{seller}} r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} - p_2^{\text{seller}} r_{\text{success}}^{\text{buyer}} > 0$$

$$\therefore p_2^{\text{seller}} (r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} - r_{\text{success}}^{\text{buyer}}) > 0$$

$$\text{つまり, } p_2^{\text{seller}} > 0 \text{ かつ } r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} - r_{\text{success}}^{\text{buyer}} > 0$$

$$p_2^{\text{seller}} > 0 \quad (5.1)$$

$$0 > r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} \quad (5.2)$$

$$E(R|s_1^{\text{buyer}}) > E(R|s_3^{\text{buyer}})$$

$$\therefore p_1^{\text{seller}} (\text{goods} + r_{\text{success}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}} r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} > p_1^{\text{seller}} (\text{goods} + r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}} r_{\text{success}}^{\text{buyer}}$$

$$\therefore p_1^{\text{seller}} (r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) > 0$$

$$\text{つまり, } p_1^{\text{seller}} > 0 \text{ かつ } r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} > 0$$

$$p_1^{\text{seller}} > 0 \quad (5.3)$$

$$r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} > 0 \quad (5.4)$$

$$E(R|s_1^{\text{buyer}}) > E(R|s_4^{\text{buyer}})$$

$$\therefore p_1^{\text{seller}} (\text{goods} + r_{\text{success}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}} r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} > p_1^{\text{seller}} (\text{goods} + r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}} r_{\text{success}}^{\text{buyer}}$$

$$\therefore p_1^{\text{seller}} (r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}} (r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} - r_{\text{success}}^{\text{buyer}}) > 0$$

$$(p_1^{\text{seller}} - p_2^{\text{seller}}) (r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) > 0$$

$$(p_1^{\text{seller}} - p_2^{\text{seller}}) (r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) > 0 \quad (5.5)$$

の 3 つを満たす必要がある。しかし、(5.2) と (5.4) は矛盾するため、 $(r_{\text{success}}^{\text{seller}}, r_{\text{failure}}^{\text{seller}}, r_{\text{success}}^{\text{buyer}}, r_{\text{failure}}^{\text{buyer}})$  がいかなる実数の組でも条件①は成り立たない。

### 条件②が成り立たないことの証明

また、条件②の必要条件である  $E(R|s_1^{\text{seller}}) > E(R|s_2^{\text{seller}})$  かつ  $E(R|s_2^{\text{buyer}}) > E(R|s_1^{\text{buyer}})$  かつ  $E(R|s_2^{\text{buyer}}) > E(R|s_3^{\text{buyer}})$  かつ  $E(R|s_2^{\text{seller}}) > E(R|s_4^{\text{buyer}})$  を満たすためには、  
 $E(R|s_2^{\text{buyer}}) > E(R|s_1^{\text{buyer}})$

$$\therefore p_1^{\text{seller}} (\text{goods} + r_{\text{success}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}} r_{\text{success}}^{\text{buyer}} > p_1^{\text{seller}} (\text{goods} + r_{\text{success}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}} r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}$$

$$\therefore p_2^{\text{seller}}(r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) > 0$$

$$0 \leq p_2^{\text{seller}} \leq 1 \text{ より,}$$

$$p_2^{\text{seller}} > 0 \text{ かつ } r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} > 0$$

$$p_2^{\text{seller}} > 0 \quad (5.6)$$

$$r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} > 0 \quad (5.7)$$

$$E(R|s_2^{\text{buyer}}) > E(R|s_3^{\text{buyer}})$$

$$\therefore p_1^{\text{seller}}(\text{goods} + r_{\text{success}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}}r_{\text{success}}^{\text{buyer}} > p_1^{\text{seller}}(\text{goods} + r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}}r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}$$

$$\therefore p_1^{\text{seller}}(r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}}(r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) > 0$$

$$\therefore (p_1^{\text{seller}} + p_2^{\text{seller}})(r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) > 0$$

$$p_1^{\text{seller}} + p_2^{\text{seller}} = 1 > 0 \text{ より,}$$

$$r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} > 0$$

$$r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} > 0 \quad (5.8)$$

$$E(R|s_2^{\text{buyer}}) > E(R|s_4^{\text{buyer}})$$

$$\therefore p_1^{\text{seller}}(\text{goods} + r_{\text{success}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}}r_{\text{success}}^{\text{buyer}} > p_1^{\text{seller}}(\text{goods} + r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) + p_2^{\text{seller}}r_{\text{success}}^{\text{buyer}}$$

$$\therefore p_1^{\text{seller}}(r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}}) > 0$$

$$p_1^{\text{seller}} > 0 \text{ かつ } r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} > 0$$

$$p_1^{\text{seller}} > 0 \quad (5.9)$$

$$r_{\text{success}}^{\text{buyer}} - r_{\text{failure}}^{\text{buyer}} > 0 \quad (5.10)$$

ここで, (5.7), (5.8), (5.10) を満たす  $(r_{\text{success}}^{\text{buyer}}, r_{\text{failure}}^{\text{buyer}})$  の組はシステムから決定できるため,

$$p_2^{\text{seller}} > 0 \text{ かつ } p_1^{\text{seller}} > 0 \text{ であれば,}$$

$E(R|s_2^{\text{buyer}}) > E(R|s_1^{\text{buyer}})$  かつ  $E(R|s_2^{\text{buyer}}) > E(R|s_3^{\text{buyer}})$  かつ  $E(R|s_2^{\text{buyer}}) > E(R|s_4^{\text{buyer}})$  を満たすことができる。

ここで仮に  $p_2^{seller} > 0$  かつ  $p_1^{seller} > 0$  が成り立ち  $buyer$  が戦略  $s_2^{buyer}$  を選択するととする。

このとき、 $buyer$  が各戦略をとる確率  $(p_1^{buyer}, p_2^{buyer}, p_3^{buyer}, p_4^{buyer})$  は  $(0, 1, 0, 0)$  と表せる。

ここで、 $p_1^{buyer} = p_4^{buyer} = 0$  のため、 $E(R|s_1^{seller}) > E(R|s_2^{seller})$  は成り立たない。

それゆえに、条件②は成り立たない。

以上より、条件①もしくは条件②のいずれかの条件を満たす  $(r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer})$  の組を「商取引システム」から決定することはできない。

## 5.6 結論

本稿では、商取引において不正行為を防止するためには、「行動観察不可の条件」を満たした「第 3 者に依存しない仲介システム」が存在している必要があることを論じた。その上で、そのシステムが存在するのかを検証するために、下記の条件を付随した「商取引システム」と、それを仲介とした「商取引ゲーム」を定義して、商取引で不正行為を防止できるインセンティブ設計が可能かを確かめた。

- システムは  $buyer$  によって報告された商取引の結果を観察できる。
- システムは  $seller$  と  $buyer$  がどの戦略を選んだかはわからない。
- 商取引に参加する  $player$  は合理的に (利得の期待値が最も高い) 戦略を決定する。
- システム内には追跡可能な通貨が存在しており、商取引にはその通貨が用いられる。
- システムからは  $player$  の通貨の保有量を操作することができる。

その結果として、不正行為が防止されるための 2 つの戦略組のいずれかに  $seller$  と  $buyer$  の戦略を帰着させるような利得の組を商取引システムから決定することはできないことを証明した。これはつまり、人々は合理的であるという仮定の上で成り立つ「商取引ゲーム」において、不正行為を防止することが不可能であることを意味する。

社会契約は複数の商取引の連鎖と捉えることができる。デイビッドヒュームは同じように考えて、商取引において双方にメリットがあるから社会契約は成立すると考えた。囚人のジレンマから必ずしもパレート最適な答えにたどり着くわけではないことがわかる。商取引において、不正を防止するインセンティブ設計は可能か？ 無法地帯での無人売買機問題商取引システム

## 第6章 倫理ある商取引ゲーム

前章では合理的なプレイヤー達による「商取引ゲーム」において、不正を防止するインセンティブ設計が不可能であることを示した。しかしながら、現実に住む我々は商取引で必ず不正に合うわけではなく、ある程度は不正が防止されている。本章では、この理論と現実の差異は限定合理性にあると考え、そうした戦略をとるプレイヤーのみで構成されたときに不正を防止することができる「倫理ある商取引ゲーム」をモデリングする。そして、そのモデルが全ての戦略をとりえるプレイヤーによって構成された「商取引ゲーム」においても、プレイヤーの構成次第で不正を防止するインセンティブ設計として機能することを示す。

### 6.1 本章における問題提起

前章では商取引ゲームにおいて必ず不正が防止できるようなインセンティブの設計が不可能であることを示した。しかしながら、現実的に私達は商取引で不正行為に遭遇することは稀である。なぜ先の理論では商取引で不正を防止するインセンティブ設計ができないにも関わらず、現実の生活の中で我々は商取引を成功させることができているのだろうか。

### 6.2 本章の仮説

不正を防止できるインセンティブ設計が可能になっているためだと思われる。限定合理性とは、認知能力の限界によって意思決定主体が限られた合理性しか持ち得ないことである。各プレイヤーにとっての最適な戦略は他のプレイヤーがとる戦略に依存しているため、当然、一部のプレイヤーが合理的に戦略を選ばないのであれば最適な戦略の均衡点も変化する。それによって、全てのプレイヤーが合理的である「商取引ゲーム」においては不可能だった相手が不正を行う可能性を推定することが可能になり、不正を防止するインセンティブ設計が可能になると予想される。

### 6.3 提案手法

このような限定合理性を「倫理」と呼び、不正行為にあった場合に必ず「失敗」を報告する行動規範とする。また、この倫理に従うプレイヤーのみによって構成される「商取引ゲーム」を「倫理ある商取引ゲーム」とする。本章では、「倫理ある商取引ゲーム」において、不正が防止されるインセンティブ設計を行い、そのインセンティブ設計を通常の「商取引ゲーム」にも適用することで、プレイヤーの構成によっては不正を防止することが可能になることを示す。

#### 6.3.1 倫理ある商取引ゲーム

「倫理ある商取引ゲーム」とは、*seller* が不正を行った場合に *buyer* がかならず「失敗」を報告する「商取引ゲーム」である。このゲームのゲーム木と非協力戦略型ゲームの利得は図 6.2 と表 6.1 のように表せる。

### 6.3.2 誠実な戦略をとった割合と成功が報告される割合の関係

「倫理ある商取引ゲーム」においては、全てのプレイヤーは「倫理」に従っているため、商取引の真の成功率は「商取引システム」に「成功」が報告された割合以上となる。つまり、任意のプレイヤー  $p$  と  $q$  が過去に「商取引ゲーム」を行った際に、誠実な戦略 ( $s_1^{seller}$  もしくは  $s_1^{buyer}$ ) をとってきた割合  $HonestStrategyRate(p, q)$  と、成功が報告された割合  $ReportedSuccessRate(p, q)$  について、次の関係がいえる。

$$HonestStrategyRate(p, q) \geq ReportedSuccessRate(p, q) \quad (6.1)$$

## 6.4 「倫理ある商取引ゲーム」において不正が防止される条件

### 6.4.1 不正が抑制される戦略組と期待利得の不等式

「倫理ある商取引ゲーム」において、不正を防止するためには、*seller* と *buyer* の戦略組を ( $s_1^{seller}, s_1^{buyer}$ ) に帰着させる必要がある。そのためには *seller* が戦略  $s_1^{seller}$  をとった場合の期待利得  $E(r|s_1^{seller})$  が戦略  $s_2^{seller}$  をとった場合の期待利得  $E(r|s_2^{seller})$  より大きく、*buyer* が戦略  $s_1^{buyer}$  をとった場合の期待利得  $E(r|s_1^{buyer})$  が戦略  $s_3^{buyer}$  をとった場合の期待利得  $E(r|s_3^{buyer})$  より大きくならなければならない。つまり、 $E(r|s_1^{seller}) > E(r|s_2^{seller})$  かつ  $E(r|s_1^{buyer}) > E(r|s_3^{buyer})$  を満たす ( $r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer}$ ) の組を「商取引システム」から決定できる必要がある。

### 6.4.2 *seller* と *buyer* の期待利得

*seller* と *buyer* の各戦略の利得の期待値は以下のように表せる。

$$E(R|s_1^{seller}) = p_1^{buyer}(r_{success}^{seller} + \epsilon^{seller}) + p_3^{buyer}(r_{failure}^{seller} + \lambda^{seller})$$

$$E(R|s_2^{seller}) = p_1^{buyer}(goods + r_{failure}^{seller} + \lambda^{seller}) + p_3^{buyer}(goods + r_{failure}^{seller} + \lambda^{seller})$$

$$= goods + r_{failure}^{seller} + \lambda^{seller}$$

$$\because p_1^{buyer} + p_3^{buyer} = 1 \text{ (「倫理ある商取引ゲーム」において、} p_2^{buyer} \text{ と } p_4^{buyer} \text{ は 0 であるため)}$$

$$E(R|s_1^{buyer}) = p_1^{seller}(goods + r_{success}^{buyer} + \epsilon^{buyer}) + p_2^{seller}(r_{failure}^{buyer} + \lambda^{buyer})$$

$$E(R|s_3^{buyer}) = p_1^{seller}(goods + r_{failure}^{buyer} + \lambda^{buyer}) + p_2^{seller}(r_{failure}^{buyer} + \lambda^{buyer})$$

$$= p_1^{seller} goods + r_{failure}^{buyer} + \lambda^{buyer}$$

$$\because p_1^{seller} + p_2^{seller} = 1$$

### 6.4.3 *seller* が誠実な戦略をとる条件

$$E(R|s_1^{seller}) > E(R|s_2^{seller})$$

$$\therefore p_1^{buyer}(r_{success}^{seller} + \epsilon) + p_2^{buyer}(r_{failure}^{seller} + \lambda) > goods + r_{failure}^{seller} + \lambda$$

$$\therefore p_1^{buyer}(r_{success}^{seller} + \epsilon) - p_1^{buyer}(r_{failure}^{seller} + \lambda) > goods$$

$$\therefore p_1^{buyer}(r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} + \epsilon - \lambda) > goods$$

仮定より,  $\epsilon > \lambda$  のため,  $p_1^{buyer}(r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller}) \geq goods$  を満たせばよい.

$0 < p_1^{buyer}$  を仮定するならば,  $r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} \geq \frac{goods}{p_1^{buyer}}$

### 6.4.4 *buyer* が誠実な戦略をとる条件

$$E(R|s_1^{buyer}) > E(R|s_3^{buyer})$$

$$\therefore p_1^{seller}(goods + r_{success}^{buyer}) + p_2^{seller}r_{failure}^{buyer} > p_1^{seller}(goods + r_{failure}^{buyer}) + p_2^{seller}r_{failure}^{buyer}$$

$$\therefore p_1^{seller}(r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer}) > 0$$

$0 < p_1^{seller}$  を仮定するならば,

$$r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} > 0$$

上記をまとめると,  $0 < p_1^{buyer}$  かつ  $0 < p_1^{seller}$  を仮定した上で,

$$r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} \geq \frac{goods}{p_1^{buyer}} \text{ かつ } r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} > 0$$

を満たせば, 「倫理ある商取引ゲーム」で不正を防止することができる.

### 6.4.5 信頼度 $p^{player}$

ここで, 任意の *player* が誠実な戦略 ( $p_1^{seller}, p_1^{buyer}$  のいずれか) をとる主観確率を  $p_1^{player}$  とすると,  $p_1^{player}$  は各プレイヤーに対して誠実な戦略をとった割合  $HonestyStrategyRate(player, opportunity)$  と任意の重み  $w^{player}$  を用いて次のように表せる.

$$p_1^{player} \equiv \sum_{opp}^{players} w^{opp} HonestyStrategyRate(player, opp) \quad (6.2)$$



#### 6.4.6 最低信頼度 $T^{player}$

しかし、「商取引システム」からは  $HonestyStrategyRate(player, opportunity)$  は未知のため、信頼度  $p_1^{player}$  を求めることができない。そこで  $HonestyStrategyRate$  の代わりに  $ReportedSuccessRate$  を用い、信頼度  $p^{player}$  を計算するのと同じ重み  $w^{player}$  の荷重総和をとったものを、最低信頼度  $T^{player}$  と定義する。

$$T^{player} \equiv \sum_{opp}^{players} w^{opp} ReportedSuccessRate(player, opp) \quad (6.3)$$

#### 6.4.7 最低信頼度を用いた条件

ここで  $HonestyStrategyRate \geq ReportedSuccessRate$  であるため、 $p_1^{player} \geq T^{player}$  がいえる。ゆえに、

$$r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} \geq \frac{goods}{T^{buyer}} \geq \frac{goods}{p_1^{buyer}} \quad (6.4)$$

となる。

つまり、 $0 < p_1^{buyer}$  かつ  $0 < p_1^{seller}$  を仮定した上で、

$$r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} \geq \frac{goods}{T^{buyer}} \text{ かつ } r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} > 0 \quad (6.5)$$

を満たす  $(r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer})$  の組を「商取引システム」から決定できれば、「倫理ある商取引ゲーム」において不正を防止することができる。

### 6.5 実験方法

先の不正が防止される条件を満たすインセンティブ設計を行う「商取引システム」と次の 8 タイプのエージェントから重複問わずランダムに選んだ 8 体のエージェントを用意し試行を実施する。これをタイプ A のエージェントが 0~7 体を占める場合について、それぞれ 8000 回づつ繰り返し、エージェントの構成と step13 で求まる「報告された成功率」と「真の成功率」を記録する。

#### 6.5.1 エージェントの種類

下記の 8 タイプのエージェントを用意する。

Type A seller のとき商品を送り、buyer のときは商品を受け取った場合は「成功」、受け取らなかった場合は「失敗」を報告する。

Type B seller のとき商品を送り、buyer のときは商品を受け取った場合は「成功」、受け取らなかった場合は「成功」を報告する。

Type C seller のとき商品を送り、buyer のときは商品を受け取った場合は「失敗」、受け取らなかった場合は「成功」を報告する。

Type D seller のとき商品を送り、buyer のときは商品を受け取った場合は「失敗」、受け取らなかった場合は「失敗」を報告する。

Type E seller のとき商品を送らず、buyer のときは商品を受け取った場合は「成功」、受け取らなかった場合は「失敗」を報告する。

Type F seller のとき商品を送らず、buyer のときは商品を受け取った場合は「成功」、受け取らなかった場合は「成功」を報告する。

Type G seller のとき商品を送らず、buyer のときは商品を受け取った場合は「失敗」、受け取らなかった場合は「成功」を報告する。

Type H seller のとき商品を送らず、buyer のときは商品を受け取った場合は「失敗」、受け取らなかった場合は「失敗」を報告する。

### 6.5.2 試行

step 1 時刻  $t$  を 0 とする。

step 2 「商取引システム」の各エージェントの通貨保有量を 8 とする。

step 3 各プレイヤーが互いに seller と buyer のそれぞれの役割で 1 度ずつ商取引ゲームを行う順序を決定する。(順序の長さは 56 となる)

step 4 時刻  $t$  を 1 進める。

step 5 step 3 で決定した順序を周期として、seller と buyer を決定する。

step 6 「商取引システム」はこれまで報告された結果から、「成功」と「失敗」が報告された場合の seller と buyer の通貨保有量を計算する。

step 7 seller は自身の戦略に基づいて、buyer に商品を送るか、もしくは商品を送らない。

step 8 buyer は自身の戦略と step 6 の seller の行動に基づいて、「商取引ゲーム」の結果を決定する。

step 9 buyer は決定した結果を「商取引システム」に報告する。

step 10 「商取引システム」は step 6 で計算した通貨保有量がいずれの場合にも 0 未満にならない場合、buyer から報告された結果を記録する。

step 11 step 6 で計算した通貨保有量がいずれの場合にも 0 未満にならない場合、真の結果を記録する。

step 12 時刻  $t$  が 1120 未満なら、step 4 に戻る。

step 13 過去 56 回の商取引ゲームにおいて、step 10 と 11 で記録された結果を集計し、それぞれ「報告された成功率」と「真の成功率」を求める。

## 6.6 「商取引システム」の詳細

本節ではシミュレーションを実装するにあたって必要となる商取引システムの仕様の詳細の一部を紹介する。完全な実装については、GitHub のソースコードを参照。

### 6.6.1 ReputationWeight

最低信頼度  $T^{player}$  を求めるためには、 $ReportedSuccessRate(p, q)$  に係る任意の重み  $w^{player}$  を決定する必要がある。この重み  $w^{player}$  は、任意の  $player$  が誠実な戦略をであろう主観確率を考える際にその  $player$  と取引相手  $opportunity$  との間での報告された成功率  $ReportedSuccessRate(player, opportunity)$  をどの程度信頼するかを表している。本論では、保有している通貨の全体に占める割合を ReputationWeight  $w^{player}$  任意の  $player$  の通貨保有量を  $b^{player}$  としたとき、

$$w^{player} \equiv \frac{b^{player}}{\sum_i^{players} b^i}$$

### 6.6.2 「成功」が報告された場合の通貨保有量の変化

「商取引ゲーム」において、 $buyer$  から成功が報告された場合、 $buyer$  は商品  $goods$  の価格  $price$  だけ通貨保有量が減り、 $seller$  は  $price$  だけ通貨保有量が増えるものとする。

そのため商取引前後では  $seller$  と  $buyer$  の残高の合計は変化しない。ここから、 $r_{success}^{seller}$  と  $r_{success}^{buyer}$  は以下のように記せる。

$$\begin{aligned} r_{success}^{seller} &= price \\ r_{success}^{buyer} &= -price \\ r_{success}^{seller} + r_{success}^{buyer} &= 0 \end{aligned}$$

### 6.6.3 EscrowCost

まずは「失敗」が報告された時に  $seller$  と  $buyer$  から失われる通貨の量の合計を  $EscrowCost$  とおいて考え、同時に商品価格  $price$  にエスクロー係数  $E$  を掛けたものとする。（ここで  $price$  は  $goods$  の価格である）

$$\begin{aligned} EscrowCost &\equiv (r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer}) + (r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller}) \\ &= E \cdot price \end{aligned} \tag{6.6}$$

### 6.6.4 EscrowCost の負担比率

$EscrowCost$  の負担比率は  $seller$  と  $buyer$  の最低信頼度  $T^{player}$  を用いる。

$$(r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer}) : (r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller}) = T^{buyer} : T^{seller} \tag{6.7}$$

### 6.6.5 EscrowCost の分配

「失敗」が報告されたときに *EscrowCost* が消失すると、全体の通貨量が減少して通貨の価値が上がり商品価格が下がる。商品価格の変動を防ぐために本実験では *seller* と *buyer* 以外の全てのプレイヤーに、そのプレイヤーの通貨保有量に応じて *EscrowCost* を分配する。*seller* と *buyer* を含まないのは、分配によって「商取引ゲーム」のインセンティブ設計が変化しないようにするためである。

## 6.7 評価

先の実験の結果、「報告された成功率」と「真の成功率」の両方が 100%になった場合を「不正防止の成功」とし、誠実なエージェント (タイプ A) の数と「不正防止の成功」に至った割合をプロットしたものが、図 6.1 である。(エージェント数 8 の場合は、エージェントの組み合わせが 1 通りしか存在しないため、個別に試行を行い結果を集計している。) 誠実なエージェントの数が 0 体の場合であっても不正が防止される構成が存在し、6 体以上の場合はサンプリングした全ての構成で不正の防止が成功していた。

## 6.8 結論

実験とその評価を踏まえて、「倫理」という限定合理性を仮定した上でインセンティブ設計を行うことで、プレイヤーの構成によっては「商取引ゲーム」において不正を防止することが可能であることがわかる。また、プレイヤーの構成と不正防止の成功成功の関係性については、先の実験の図のとおりである。

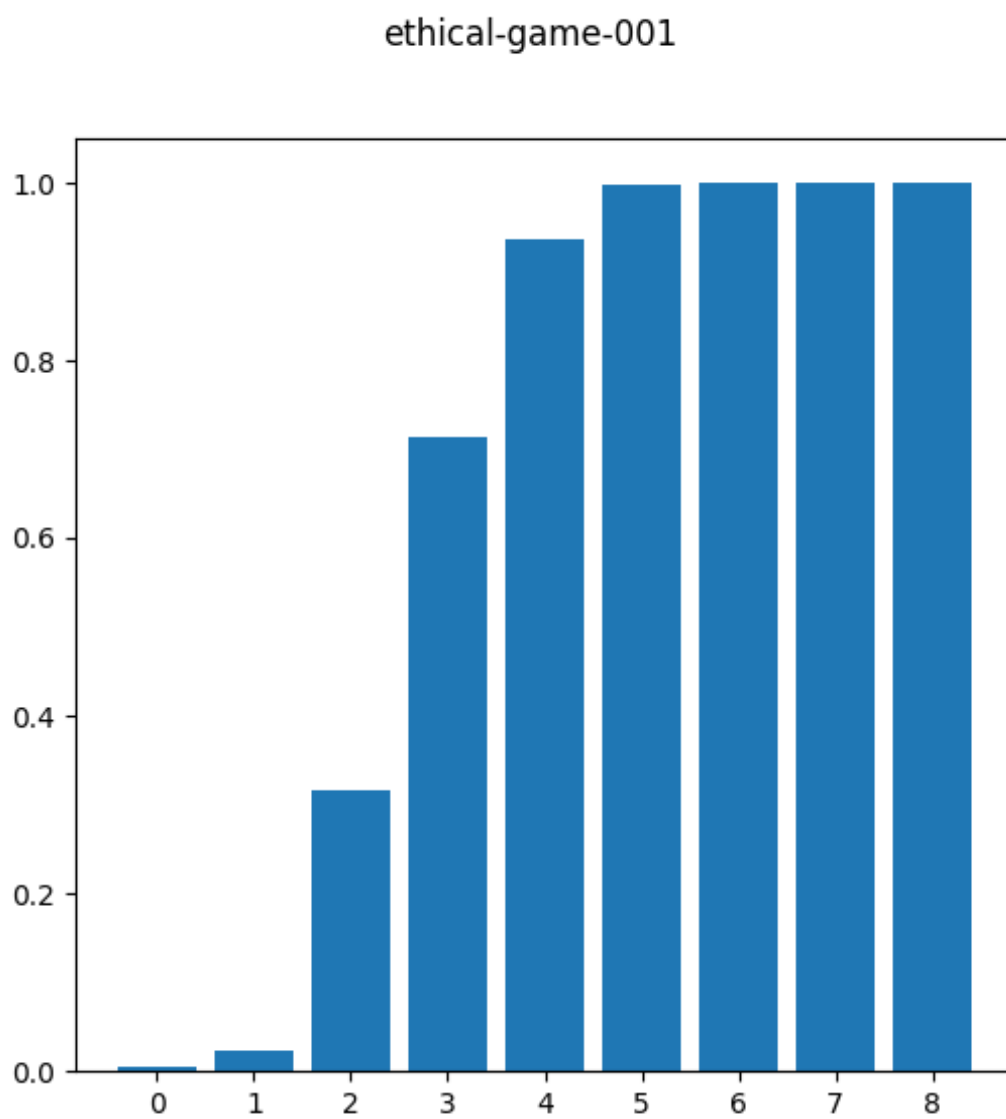


図 6.1: 誠実なエージェントの数と「不正防止の成功」に至った割合

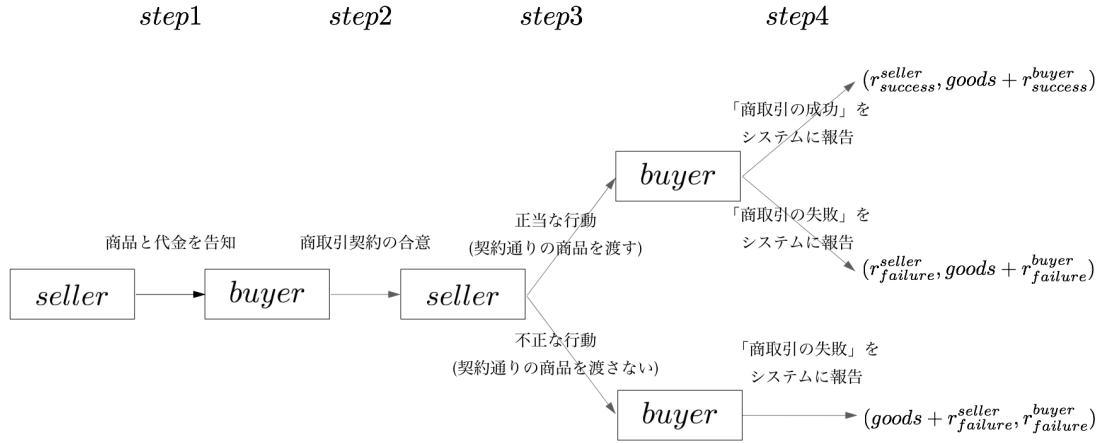


図 6.2: 「倫理ある商取引ゲーム」のゲーム木

		<i>buyer</i>	
		$s_1^{buyer}$	$s_3^{buyer}$
<i>seller</i>	$s_1^{seller}$	$(r_{success}^{seller}, goods + r_{success}^{buyer})$	$(r_{failure}^{seller}, goods + r_{failure}^{buyer})$
	$s_2^{seller}$	$(goods + r_{failure}^{seller}, r_{failure}^{buyer})$	$(goods + r_{failure}^{seller}, r_{failure}^{buyer})$

表 6.1: 非協力戦略型ゲームとして表した「倫理ある商取引ゲーム」の利得表

## 第7章 複雑系としての社会契約

「倫理ある商取引ゲーム」において、倫理という限定合理性を仮定した上で商取引システムのインセンティブ設計を行えば、プレイヤーの構成によっては不正が防止され、商取引契約の内容が果たされるようになることがわかった。本章では、この商取引契約の内容に焦点を当て、これまで外部の強制執行力として存在が仮定されていた「商取引システム」を、ある集団の成員が構成する複雑系の内部で自己組織化されたシステムとして再現する商取引契約の内容について提案し、マルチエージェントシミュレーションによって、商取引システムが存在しない場合でも、社会契約が成立しうることを示す。

### 7.1 本章の問題提起

本章では先の章で扱った「倫理ある商取引ゲーム」において、外部の強制執行力として存在が仮定されていた「商取引システム」が存在しない場合でも、プレイヤーの構成によって「商取引ゲーム」の不正を防止することが可能であるかという問いに取り組む。

### 7.2 本章の仮説

商取引システムが存在する場合に、商取引契約を履行させることが可能であるとする。このとき、各プレイヤーが商取引システムと同様の役割を演じることができれば、外部の強制執行力としての商取引システムが存在せずとも相互監視の元で商取引ゲームで不正を防止し続けることが可能となるだろう。

### 7.3 提案手法

先の仮説を検証するためには、各プレイヤーが商取引システムの役割を正しく演じる商取引契約の内容を記述し、その商取引契約の履行を約束する「商取引ゲーム」を繰り返した結果、全てのプレイヤーが「商取引ゲーム」で不正を行えない状態になりうることを示す必要がある。

ここで、「商取引システム」とはどういったシステムであったかに立ち返ると、「商取引システム」とは、各プレイヤーの初期の通貨保有量と保存された各時刻の商取引の記録から、各プレイヤーの通貨保有量を一意に決定するシステムである。それ故、初期の通貨保有量と保存された各時刻の商取引の記録が全てのプレイヤーで一致しているとき、全てのプレイヤーが商取引システムが正しく動作しているといえる。

それを実現するためには、各プレイヤーが保存している過去の商取引の記録を互いに確認し合い、差異が生じた場合に全てのプレイヤーに「失敗」を報告する商取引契約の内容を記述すればよい。

そこで、本章では下記のような「成員の振る舞い」を提案し、先の仮説が成り立つことを検証する。

#### 7.3.1 成員の振る舞い

- 事前の合意に基づいた全てのプレイヤーの人数  $n$  と各プレイヤーの初期の通貨保有量  $b_i, \dots, b_n$  を定義する。

- 事前の合意に基づいた各プレイヤーが他の全てのプレイヤーと *seller* と *buyer* のそれぞれの役割で 1 度づつ「商取引ゲーム」を行う周期を定義する。(周期の長さは  $n * (n - 1)$ )
- 事前の合意に基づいた仕様に従った商取引システムを用意する。
- 事前の合意に基づいた商取引契約の内容を定義する。
- 時刻  $t$  において、「時刻  $t$  における成員の振る舞い」を上から順に実行する。
- 商取引の記録とは、商取引が行われた時刻  $t$  と *seller*、*buyer*、結果、報告者からなる記録とする。

### 7.3.2 時刻 $t$ における成員の振る舞い

step 1 現在時刻の *seller* と *buyer* を決定する。

step 2 自身が *seller* ならば、時刻  $\max\{0, t - n * (n - 1)\}$  から時刻  $t$  までの各時刻  $k$  について、保管されている商取引の記録のうち、時刻が  $k$  で報告者がその商取引の記録の *buyer* と一致するものを全て集め複製する。その複製された全ての商取引の記録に署名して *buyer* に送信する。

step 3 自身が *buyer* ならば、*seller* から受け取った記録の署名を検証し、添付された全ての商取引の記録の報告者を *seller* に書き換えて保管する。*seller* からメッセージを受け取っていない場合、この step では何もしない。

step 4 自身が *buyer* ならば、時刻  $\max\{0, t - 2 * n * (n - 1)\}$  から時刻  $\max\{0, t - n * (n - 1)\}$  までの各時刻  $k$  について、保管されている商取引の記録のうち、時刻が  $k$  のものを集め、それらの結果が全て一致しているかを確認する。もし一致している場合、その一致した結果を商取引システムに報告された結果として入力する。一致しない場合、またはその時刻の商取引の記録が存在しない場合、報告された結果として自身の商取引システムに「失敗」を入力する。

step 5 自身が *buyer* ならば、商取引契約の結果を決定する。

step 6 step5 で決定した結果をもとに商取引の記録を作成し、署名して、全てのプレイヤーに送信する。

step 7 *buyer* から報告された商取引の記録を保管する。この際、記録の報告者は *buyer* とする。*buyer* から報告を受け取っていない場合、この step では何もしない。

## 7.4 実験方法

ここでは「時刻  $t$  における成員の振る舞い」の step 6 が必ず遵守される状態を作り出せるかを確認するため、下記の「実験用の商取引契約」を合意された商取引契約として、これを履行する場合と履行しない場合で 4 種づつ、計 8 タイプのエージェントを用意する。この 8 タイプのエージェントから重複問わずランダムに選んだ 8 体のエージェントを用意し試行を実施する。これをタイプ A のエージェントが 0~7 体を占める場合について、それぞれ 8000 回づつ繰り返し、エージェントの構成と step9 で求まる「報告された成功率」と「真の成功率」を記録する。

### 7.4.1 実験用の商取引契約

*seller* が「成員の振る舞い」の step6 の通りに振る舞う対価として、*buyer* が通貨を 1 支払う商取引契約を結ぶ。*buyer* は *seller* がこの商取引を履行したかどうかを「step6 の検証」によって確認することができる。



### 7.4.2 step6 の検証

時刻  $t$  において、*buyer* は *seller* が「成員の振る舞い」の step6 を履行したかを下記の 2 つの検証で確かめることができる。検証 1 は全てのプレイヤーに同じ商取引の結果を送信したことを検証する方法であり、検証 2 は *buyer* に商取引の結果を送信したかを検証する方法である。

**検証 1** 時刻  $\max\{0, t - 2 * n * (n - 1)\}$  から時刻  $\max\{0, t - n * (n - 1)\}$  までのうち、その時刻に行われた商取引の *buyer* が現在時刻の商取引の *seller* である各時刻  $k$  について、保管されている商取引の記録のうち、時刻が  $k$  のものを集め、その中に報告者が時刻  $t$  の商取引の *seller* が存在し、それらの結果が一致していることを確認する。

**検証 2** 時刻  $\max\{0, t - 2 * n * (n - 1)\}$  から時刻  $\max\{0, t - n * (n - 1)\}$  までのうち、その時刻に行われた商取引の *buyer* が現在時刻の商取引の *seller* である各時刻について、保管されている商取引の記録のうち、その時刻の商取引の記録を集めて、その中に報告者が現在時刻の商取引の *seller* である記録が存在するかを確認する。

### 7.4.3 エージェントの種類

下記の 8 タイプのエージェントを用意する。下記に記述のない振る舞いに関しては「成員の振る舞い」に従う。

- A 完全に商取引契約を履行するエージェント
- B step5 を無視して必ず「成功」を報告するエージェント
- C step5 と逆の結果を報告するエージェント
- D step5 を無視して必ず「失敗」を報告するエージェント
- E step6 でタイプ A にだけ結果を送らないエージェント
- F step6 でタイプ A にだけ結果を送らず、step5 を無視して必ず「成功」を報告するエージェント
- G step6 でタイプ A にだけ結果を送らず、step5 と逆の結果を報告するエージェント
- H step6 でタイプ A にだけ結果を送らず、step5 を無視して必ず「失敗」を報告するエージェント

### 7.4.4 試行

**step 1** 時刻  $t$  を 0 とする。

**step 2** 各プレイヤーが互いに *seller* と *buyer* のそれぞれの役割で 1 度ずつ商取引ゲームを行う順序を決定し、各エージェントが合意する。(順序の長さは 56 となる)

**step 3** プレイヤー数は 8、初期の通貨保有量は各プレイヤー 8、商取引システムの仕様は前章の実験と同じものとし、各エージェントが合意する。

**step 4** 時刻  $t$  を 1 進める。

**step 5** 各エージェントはその特性に則って振る舞う。

**step 6** 各エージェントの「商取引システム」において、時刻  $t$  の入力によって誰の通貨保有量も 0 未満にならない場合、報告された結果を記録する。

**step 7** 各エージェントの「商取引システム」において、時刻  $t$  の入力によって誰の通貨保有量も 0 未満にならない場合、真の結果を記録する。

**step 8** 時刻  $t$  が 1120 未満なら、step4 に戻る。

**step 9** 各エージェントの「商取引システム」において、過去 56 回分の step5 と 6 で記録された結果を集計し、それぞれ「報告された成功率」と「真の成功率」を求める。

## 7.5 評価

サンプリングした結果を元に、タイプ A のエージェントと自己組織化が成功した割合をプロットすると、図 7.1 のようになる。この図から、誠実なプレイヤーが 6 人以上の場合は全てのサンプルで自己組織化に成功していることがわかる。

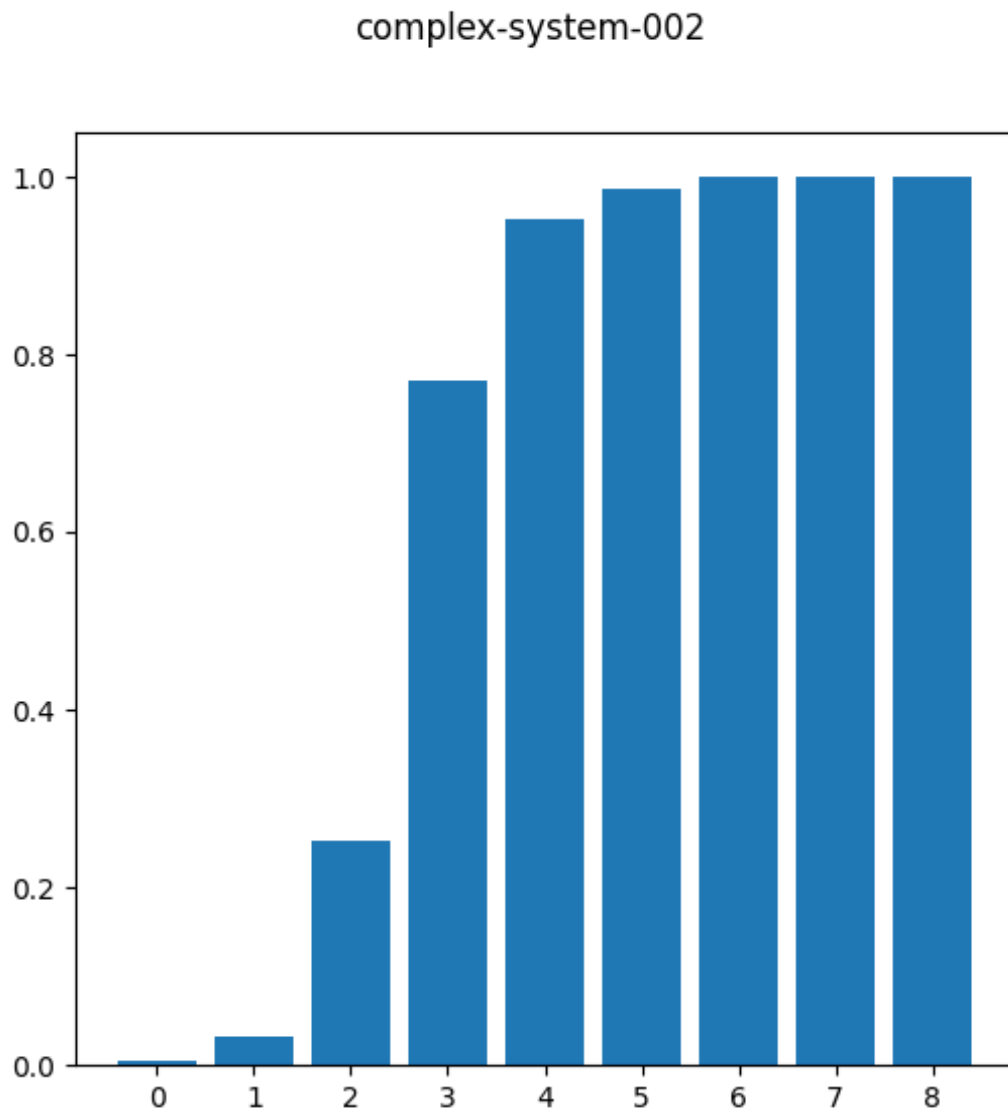


図 7.1: 誠実なエージェントの数と自己組織化に成功した割合

## 第8章 結論

### 8.1 本論のまとめ

### 8.2 本論の課題

### 8.3 今後の研究

## 謝辭

## 参考文献

- [1] Bruno Verbeek and Christopher Morris. Game Theory and Ethics. In Edward N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, Winter 2020 edition, 2020.
- [2] GSMA.
- [3] Google.
- [4] Facebook.
- [5] Satoshi Nakamoto. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. 2008.
- [6] Kenji Saito and Shugo Ikemoto. 地球規模 os 外殻 (シェル) の開発と応用. 2008.
- [7] Ken Binmore. *Natural Justice*. New York: Oxford University Press, 2005.
- [8] Jean-Jacques Rousseau. *Discourse on the Origin of Inequality*. Oxford University Press, USA, 1999.
- [9] Brian Skyrms. The stag hunt. In *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association*, volume 75, pages 31–41. JSTOR, 2001.
- [10] Werner Güth, Rolf Schmittberger, and Bernd Schwarze. An experimental analysis of ultimatum bargaining. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 3(4):367–388, 1982.
- [11] LESLIE LAMPORT, ROBERT SHOSTAK, and MARSHALL PEASE. The byzantine generals problem. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 4(3):382–401, 1982.