

# 計算可能な複雑系としての社会契約とそのカオスの分析

Nozomu Miyamoto<sup>1</sup>   nontan@sfc.wide.ad.jp

2021 年 6 月 6 日

## 概要

ここに概要を書きましょう。



# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>4</b>
1.1 なぜ私たちは法に従うのか？	4
1.2 これまでの社会契約の議論	4
1.3 インターネットと社会契約	5
1.4 社会契約とは	5
1.5 本論の目的	5
1.6 本論のアプローチ	5
1.7 本論の構成	6
<b>第2章 背景</b>	<b>8</b>
2.1 社会契約	8
<b>第3章 商取引ゲーム</b>	<b>9</b>
3.1 商取引の連鎖	9
3.2 コンヴェンションと囚人のジレンマ	9
3.3 メカニズムデザインで商取引の不正防止は可能か？	9
3.4 行動観察不可の条件	10
3.5 無法地帯での商取引	10
3.5.1 商取引システム	10
3.6 商取引ゲーム	10
3.6.1 ゲームの進め方	10
3.6.2 ゲーム木	10
3.6.3 非協力戦略型ゲーム	11
3.7 不正防止の不可能性の証明	12
3.7.1 前提の整理	12
3.7.2 不正行為が起きない戦略組とその条件	12
3.7.3 命題	13
3.7.4 証明	13
3.8 結論	16
<b>第4章 倫理ある商取引ゲーム</b>	<b>18</b>
4.1 倫理とは	18
4.2 倫理ある行動	18
4.3 倫理ある商取引ゲーム	18
4.3.1 倫理ある商取引ゲーム	18
4.3.2 誠実な戦略が取られた割合と報告された成功率の関係	20

4.3.3	自己信頼 . . . . .	20
4.3.4	将来期待利得 . . . . .	20
4.4	不正が防止される条件 . . . . .	20
4.4.1	不正が抑制される戦略組と期待利得の不等式 . . . . .	20
4.4.2	<i>seller</i> と <i>buyer</i> の期待利得 . . . . .	20
4.4.3	<i>seller</i> が誠実な戦略をとる条件 . . . . .	21
4.4.4	<i>buyer</i> が誠実な戦略をとる条件 . . . . .	21
4.4.5	相手の誠実さ $P^{player}$ . . . . .	21
4.4.6	最低信頼度 $T^{player}$ . . . . .	21
4.5	倫理ある商取引システムの詳細 . . . . .	22
4.5.1	取引成功前後の残高の変化 . . . . .	22
4.5.2	エスクロー係数 $E$ . . . . .	22
4.5.3	負担比率 . . . . .	22
4.5.4	責任比重関数 $w(x)$ . . . . .	22
4.5.5	ReputationWeights . . . . .	23
4.5.6	EscrowCost の分配 . . . . .	23
4.5.7	EscrowWeights . . . . .	23
4.5.8	謎の条件 . . . . .	23
4.5.9	残高の変化量の組 $(r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer})$ . . . . .	23
4.6	実験方法 . . . . .	24
4.6.1	「倫理ある商取引ゲーム」での実験 . . . . .	24
4.6.2	「商取引ゲーム」での実験 . . . . .	24
4.7	評価 . . . . .	24
4.7.1	「倫理ある商取引ゲーム」での評価 . . . . .	24
4.7.2	「商取引ゲーム」での評価 . . . . .	25
4.8	考察 . . . . .	25
<b>第 5 章</b>	<b>複雑系としての社会契約</b>	<b>26</b>
5.1	提案手法 . . . . .	26
5.1.1	「商取引システム」を自己組織化する商取引契約 . . . . .	26
5.2	実験方法 . . . . .	27
5.2.1	8 種類のエージェント . . . . .	27
5.3	評価 . . . . .	27
<b>第 6 章</b>	<b>おわりに</b>	<b>28</b>
6.1	本論のまとめ . . . . .	28
6.2	本論の課題 . . . . .	28
6.3	今後の研究 . . . . .	28

# 第1章 序論

## 1.1 なぜ私たちは法に従うのか？

普段、我々は、人々が法に従うことを当然のように信じており、この問いについて深く考えることはめったにない。例えば、あなたが近所のお店でコーヒーを注文したとしよう。あなたはメニューを見て、注文を行い、代金を支払って、コーヒーを受け取る。結果的に、あなたはコーヒーを手にして、店主は代金を手にする。日常的に経験するであろう法の守られた世界である。

しかし、仮に、あなたがメニューを見て、注文を行い、請求された金額を支払ったのに、店主が飲み物を渡さなかったとしよう。あなたは次にどうするだろうか。警察に通報するだろうか、裁判所に訴えて返金を要求するだろうか。もし警察に通報したり、裁判所に訴えたりしたとして、彼らと店主が共謀していて、不正をなかったことにされたらどうするだろうか。

我々は無意識にどこかで、店主を信頼している。そうでなくとも、店主が不正を働いた場合に、警察が解決してくれることを信頼している。仮に店主と警察の間で賄賂が渡されており、両者が共謀していたとしても、裁判所が正常に機能していることを信頼している。裁判所が機能しなくても不正を行ったものが他の何かを罰してくれることを信じている。

つまるところ、我々は、不正が起きても当事者でない強制力をもった機関（外部の強制執行機関）がその不正を正してくれることを信じている。そうでなくとも、その機関が不正を働いても、さらなる外部の強制執行機関がその不正を正してくることを信じている。そして、我々は暗黙のうちにどこかでこの信頼の連鎖の根源を考えることをやめてしまう。

なぜ店主は信頼できるのか？なぜ警察は信頼できるのか？なぜ裁判所は信頼できるのか？なぜ国家は信頼できるのか？なぜ法律は信頼できるのか？なぜ立法機関は信頼できるのか？なぜ国会議員は信頼できるのか？なぜ国民は信頼できるのか？

この信頼の連鎖の根源を探ることが、「なぜ私たちは法に従うのか？」という問いに、理論的な答えを導き出すことに繋がるだろう。

## 1.2 これまでの社会契約の議論

これまで、この問いは社会契約という領域で研究されてきた。近代において、はホッブズやロック、ルソーによって、民主国家の正当性を示すために議論され、王権神授説に対する反論としてフランス革命の理論的な石杖となった。現代においては、ロールズやハースニーが彼らの社会契約を一般化したモデルを構築し、「公正な正義とはいかなるものか？」という問いへの議論に発展した。

社会契約は議論は伝統的に、自然状態と社会状態の2つの状態を仮定することから始まる。自然状態とは、ある集団において、その成員が法に従うことに強制力の働かない状態であり、社会状態とは、全ての成員が法に従うことに強制力の働く状態である。この自然状態から社会状態へと遷移するプロセスを明らかにすることで、法に従うことに強制力が働くメカニズムの解明を試みてきた。

最近では、このメカニズムをゲーム理論や進化ゲーム理論を用いて解析した研究も増えており、「道徳とは何か?」、「どのような場合に我々は法に従うのか?」、「どういったプロセスで法に従うのか」というより派生した問いに主眼が置かれている。

### 1.3 インターネットと社会契約

社会の動向の変化とともに、社会契約のメカニズムの解明には、新たな意義が生まれてきている。その最もたる変化は、インターネットが国家を超越した地球のインフラになろうとしていることである。今や、Google や Facebook のようなサービスは世界中にユーザーを抱えており、提供元となっている企業は複数の国家にその支社を構える多国籍企業となっている。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い。

また、近年では、「誰にも送金を止めさせない」という目的に基づいた Bitcoin のようなブロックチェーン技術の登場により、国家に依存しない形でシステムを運用しようとする試みが増えている。こうした動きは「地球規模 OS」のような概念の必要性を感じさせる。

こうしたインターネットの急速なグローバル化から生じるのは、国家を超越したインターネット上のサービスの正当性を誰が担保するのかという問題である。これまではサービスの正当性は、国家の法に縛られた企業が保証していればよかったが、これからはインターネットを国家を超越した地球のインフラと考え、そのガバナンスを担保する新たな取り決めが国家を超えたところで必要となる。それゆえ、国家を超越したインターネット上のサービスの正当性を保証するためにも、そのサービスのユーザーがコンピューターを用いて社会契約を果たせるモデルの構築が必要である。

### 1.4 社会契約とは

ここまでの議論から、本論における社会契約とは、ある集団において、その一員もしくは全員がある取り決めに合意することによって、その取り決めに強制力を生じさせるプロセスと定義する。

### 1.5 本論の目的

本論の目的は社会契約を一般化した計算可能なモデルを構築し、コンピューターシミュレーションを用いて、ある集団の成員の性質と社会契約の成立の関係性を明らかにすることである。

先に述べたように、我々の見据えるインターネット上での社会契約において、人々はコンピューターを用いて、それを成すことになる。ならば社会契約のモデルは計算可能なレベルで一般化される必要があるだろう。また、はじめに述べたように、我々の生きる社会は完全な無法地帯でなければ、全員が法に従っているわけでもない。中には、法に反した行動をとりながらも、モデルが完成しただけでは実用にはいたれない、そのシステムがいかなる場合にどれだけ安全であるのかを知る必要がある。そのため、モデルを構築するとともに、コンピューターシミュレーションによってその安全性を検証する。

### 1.6 本論のアプローチ

本論では、ある集団において外部の強制執行力に依らずに取り決めが遵守されるのは、各成員の振る舞いによる複雑系の中で取り決めを遵守させるシステムが自己組織化されているためだと考

え、その複雑系の詳細を商取引ゲームというアイデアを基にモデリングを試みる。商取引ゲームとは、商取引システムという唯一の外部の強制執行力の存在を仮定した上で、商取引をモデリングした非協力戦略型ゲームである。この商取引システムは、商取引契約が履行されたか否かの真の結果を観察することはできないが、プレイヤーから報告された結果を観察することができ、それに応じて各プレイヤーの通貨の保有量を操作することのできるシステムである。

本論のアプローチは主に2つの段階に分けることができる。1つは、この商取引システムの通貨の保有量を操作する機能を用いて、商取引ゲームにおいて不正が生じないようなインセンティブ設計を行うことであり、もう1つは、商取引契約の内容にプレイヤーの振る舞いを記述することで、この商取引システムを複雑系の内部で自己組織化されたシステムとして設計することである。

この2つのアプローチが成功したとき、商取引契約の内容には、不正を防止可能なインセンティブ設計を行える商取引システムを～が定義されており、この商取引契約はその契約によって自己組織化された内部の商取引システムによって履行されるようになるはずである。

ここで商取引契約の内容とは先に定義した社会契約における取り決めであり、プレイヤーとは同様にある集団の成員であるため、ここで本論の目的である、社会契約を一般化した計算可能なモデルの構築が果たされることとなる。

一見、契約を履行させるシステムによってそのシステムの正当性を担保する契約を履行させるという論理は、循環をはらんでいるように思えるだろうが、実際のところはこの2つの時間軸に依存しあっている。それ故に初期値によってその社会契約が成立するか否かは全く異なるものとなり、その結果を全て把握することは困難である。

しかしながら、幸いなことにこの複雑系としての社会契約は計算可能なモデルであるため、そのカオスをコンピューターシミュレーションによって近似することができるだろう。

原点に立ち返るなら「なぜ我々は法を守るのか」という疑問に対して、本論が提示できる答えは「他の人も法を守っているから」というものになるだろう。では具体的にどのような性質の成員がどのくらいいれば法が守られるのか、それが本論の提示する複雑系としての社会契約のモデルから明らかになるだろう。

## 1.7 本論の構成

先に上げた2つのアプローチについて、前者の不正を防止する商取引システムのインセンティブ設計は3章と4章で、後者の商取引システムを自己組織化する商取引契約の内容の設計は5章で説明する。

3章では利己的なプレイヤーのみで行われる商取引ゲームにおいて、報告された結果に基づいて通貨の保有量を操作しても、不正を防止することは不可能であることを示す。

4章では、商取引に失敗した場合にその結果を正しくシステムに報告するプレイヤーを倫理あるプレイヤーと考し、こうしたプレイヤーのみで行われる「倫理ある商取引ゲーム」について考える。この限定合理性の上でインセンティブ設計を行うことで、倫理あるプレイヤー以外のプレイヤーが参加する商取引ゲームであっても、参加するプレイヤー達の性質によっては不正を防止することが可能であることを示す。

5章では、商取引システムを運営する約束を、商取引ゲームで取引されていた商品(サービス)とすることで、外部の強制執行力として存在していた商取引システムを自己組織化させる。これによって、外部の強制執行力に依存することなく、社会の成員たちによって構成された複雑系の内部で商取引システムが稼働し、「倫理ある商取引ゲーム」と同様に参加するプレイヤーの性質によって不正が起きなくなることを示す。



6章では、本論では、ここまでの内容をまとめるとともに、今回紹介した複雑系としての社会契約のモデルの課題を上げ、今後の研究についての計画述べる。

## 第2章 背景

### 2.1 社会契約

## 第3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。

### 3.1 商取引の連鎖

商取引とは、買い手と売り手の2者間で行われる通貨と商品(財もしくはサービスの提供)の交換である。この定義に従うと、この社会の複数人で行われる通貨や商品のやり取りは、全て商取引に分解することができる。例えば1章の初めに述べたコーヒーの購入はもちろん、あなたとあなたと店主との間で行われるコーヒーと通貨の交換であるし、警察が不正を取り締まるのも、あなたと警察官と政府の3者間で行われる商取引である。より詳細に考えるならば、あなたと政府との間で行われる通貨と公共サービスの交換と、政府と警察官との間で行われる給料としての通貨と警察官業務というサービスの交換、2つの商取引である。仮にイギリス人の金とインド人の胡椒の物々交換であったとしても、両者の通貨に価値を換算することで、金と通貨の交換と通貨と胡椒の交換の2つの商取引といったように。それゆえ、1章1節で述べたような信頼の連鎖も複数の商取引に分解することができ、本当に商取引契約が履行される強制力が存在しているならば、そのその連鎖の根源には必ず、他の商取引によって保証されることなく必ず履行される商取引が存在しているはずである。

### 3.2 コンヴェンションと囚人のジレンマ

デイビッドヒュームは社会契約をコンヴェンションという概念を用いて説明しようとした。これは社会契約が果たされるのは、商取引によって両者の自分の欲しい物が手に入るためだとした。

デイビッドヒュームのコンベンションと似た事例として、〇〇の研究を紹介する。すたぐハントゲームを紹介する。しかし、我々は2者の戦略の結果が両者にとって最善になるからといって、必ずしもそこに行きつけるわけではないことを囚人のジレンマから学んでいる。

### 3.3 メカニズムデザインで商取引の不正防止は可能か？

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ときに、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？

### 3.4 行動観察不可の条件

### 3.5 無法地帯での商取引

この問いに答えるために、本章では無法地帯での商取引について考える。商品 (財・サービス) の引き渡しと通貨の支払いについて考える。売り手と買い手 (buyer) の 2 者間で行われる商取引。外部の強制執行力は働かない。

商取引が成功したのか失敗したのかの報告を受けて、それに応じて各プレイヤーの通貨の保有量を変更するシステムである。

#### 3.5.1 商取引システム

### 3.6 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。

#### 3.6.1 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。

#### 3.6.2 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 3.1 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 *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。

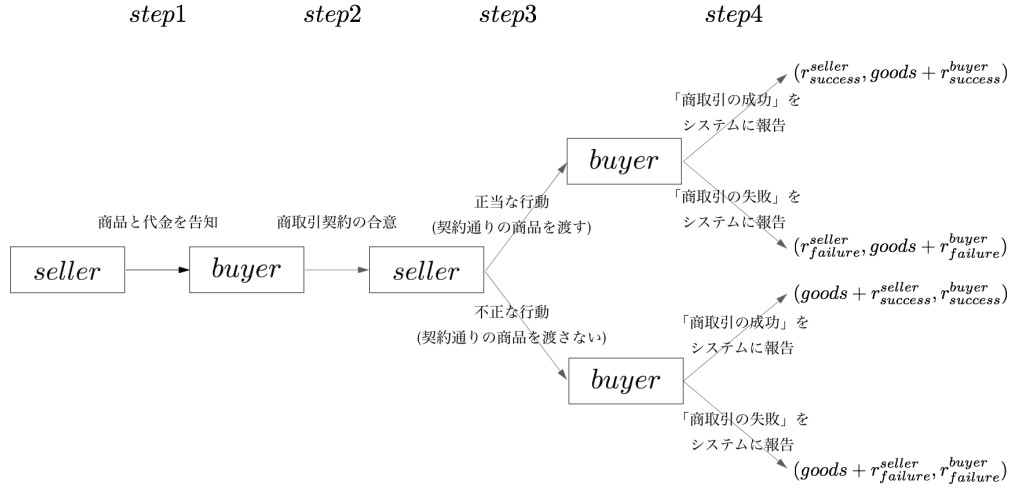


図 3.1: 「商取引ゲーム」のゲーム木

$s_1^{seller}$	$(r_{success}^{seller}, goods + r_{success}^{buyer})$	$(r_{success}^{seller}, goods + r_{success}^{buyer})$	$(r_{failure}^{seller}, goods + r_{failure}^{buyer})$	$(r_{failure}^{seller}, goods + r_{failure}^{buyer})$
$s_2^{seller}$	$(goods + r_{failure}^{seller}, r_{failure}^{buyer})$	$(goods + r_{success}^{seller}, r_{success}^{buyer})$	$(goods + r_{failure}^{seller}, r_{failure}^{buyer})$	$(goods + r_{success}^{seller}, r_{success}^{buyer})$

表 3.1: 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

### 3.6.3 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、不正な行為をとった場合は「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、不正な行為をとった場合は「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、不正な行為をとった場合は「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 3.1 のようになる。

### 3.7 不正防止の不可能性の証明

#### 3.7.1 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。

#### 3.7.2 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。

### 3.7.3 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。

### 3.7.4 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,

$p_1^{buyer} > p_4^{buyer}$  のときは,

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

$p_1^{buyer} < p_4^{buyer}$  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,

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

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

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

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

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

$$p_2^{seller} > 0 \tag{3.1}$$

$$0 > r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} \tag{3.2}$$

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

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

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

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

$$p_1^{seller} > 0 \tag{3.3}$$

$$r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} > 0 \tag{3.4}$$



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

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

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

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

$$(p_1^{seller} - p_2^{seller})(r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer}) > 0 \quad (3.5)$$

の3つを満たす必要がある。しかし、(3.2)と(3.4)は矛盾するため、 $(r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer})$  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  $E(R|s_1^{seller}) > E(R|s_2^{seller})$  かつ  $E(R|s_2^{buyer}) > E(R|s_1^{buyer})$  かつ  $E(R|s_2^{buyer}) > E(R|s_3^{buyer})$  かつ  $E(R|s_2^{buyer}) > E(R|s_4^{buyer})$  を満たすためには、  
 $E(R|s_2^{buyer}) > E(R|s_1^{buyer})$

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

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

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

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

$$p_2^{seller} > 0 \quad (3.6)$$

$$r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} > 0 \quad (3.7)$$

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

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

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

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

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

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

$$r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} > 0 \quad (3.8)$$

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

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

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

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

$$p_1^{seller} > 0 \quad (3.9)$$

$$r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} > 0 \quad (3.10)$$

ここで、(3.7)、(3.8)、(3.10) を満たす  $(r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer})$  の組はシステムから決定できるため、

$p_2^{seller} > 0$  かつ  $p_1^{seller} > 0$  であれば、  
 $E(R|s_2^{buyer}) > E(R|s_1^{buyer})$  かつ  $E(R|s_2^{buyer}) > E(R|s_3^{buyer})$  かつ  $E(R|s_2^{buyer}) > E(R|s_4^{buyer})$   
 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。

### 3.8 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4章 倫理ある商取引ゲーム

### 4.1 倫理とは

倫理とは、集団の利益のために直結する限定合理性である。

「不正防止の不可能性」より、「商取引ゲーム」においては不正を防止するインセンティブ設計ができないことがわかった。しかし、この理論上の商取引に反して、実社会の商取引においては不正行為がある程度、抑制されている。これは実社会の商取引を行う人々が、自身の利益を最大化するような利己的な行動規範に従って戦略を選んでおらず、完全な「商取引ゲーム」を行っていないためだと考えられる。本稿では、実社会の商取引において「泣き寝入り」と呼ばれるような *buyer* が不正にあった場合に「成功」を報告する戦略があまり取られていないことに着目し、*buyer* が不正にあった場合に必ず「失敗」を報告する行動規範を倫理として定義し、この倫理に従うプレイヤーのみで行われる「商取引ゲーム」を「倫理ある商取引ゲーム」とする。

### 4.2 倫理ある行動

### 4.3 倫理ある商取引ゲーム

#### 4.3.1 倫理ある商取引ゲーム

「倫理ある商取引ゲーム」においては *buyer* は *seller* が不正を行った場合にかならず「失敗」を報告するためゲーム木は Figure4.1 のようになる。また、同様に *buyer* が戦略  $s_2^{buyer}, s_4^{buyer}$  を取らないため、非協力戦略型ゲームの表は Table4.1 のようになる。

		<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 4.1: 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

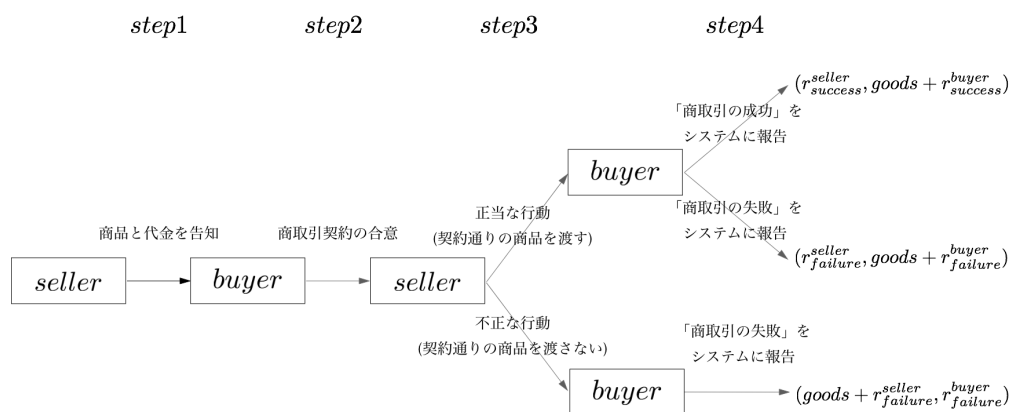


図 4.1: 「倫理ある商取引ゲーム」のゲーム木

### 4.3.2 誠実な戦略が取られた割合と報告された成功率の関係

この「倫理ある商取引ゲーム」においては、商取引が失敗した場合に必ず「失敗」が報告されるため、商取引の成功率は「商取引システム」に「成功」が報告された割合以上である。ここで任意の  $player$  が任意の  $opportunity$  と過去に「商取引ゲーム」を行った際、誠実な戦略 ( $s_1^{seller}, s_1^{buyer}$  のいずれか) をとってきた割合を  $HonestStrategyRate(player, opportunity)$  とし、同様に報告された商取引の成功率を  $ReportedSuccessRate(player, opportunity)$  とする。そのとき、 $HonestStrategyRate(player, opportunity)$  と  $ReportedSuccessRate(player, opportunity)$  の関係は次の式で表せる。

$$HonestStrategyRate(player, opportunity) \geq ReportedSuccessRate(player, opportunity) \quad (4.1)$$

### 4.3.3 自己信頼

ここで  $HonestStrategyRate(player, player)$  と  $ReportedSuccessRate(player, player)$  は1とする。これは  $player$  が  $player$  自身と行う商取引は必ず成功するためである。

### 4.3.4 将来期待利得

通常の「商取引ゲーム」においては誠実な戦略を取ってきた割合と報告された商取引ゲームの成功率の間の関係性はわからないため、繰り返しゲームと考えると次のゲームへ引き継げる情報がなかったため将来期待利得を考慮しなかったが、「倫理ある商取引ゲーム」においては先に述べた関係式が得られるため、将来期待利得を考慮する必要がある。商取引で「成功」が報告された場合の  $seller$  と  $buyer$  の将来期待利得を  $\epsilon^{seller}, \epsilon^{seller}$  とし、「失敗」が報告された場合の将来的な期待利得を  $\lambda^{seller}, \lambda^{buyer}$  とおくと、「倫理ある商取引ゲーム」のゲーム木と非協力戦略型ゲームの表は次のように書き換えられる。また、本稿では、これらについて  $\epsilon^{player} > \lambda^{player}$  と仮定する。

## 4.4 不正が防止される条件

### 4.4.1 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」において不正が生じないためには  $seller$  と  $buyer$  の戦略組を ( $s_1^{seller}, s_1^{buyer}$ ) に帰着させなくてはならない。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。つまりは、 $E(r|s_1^{seller}) > E(r|s_2^{seller})$  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。

### 4.4.2 $seller$ 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。

$$\begin{aligned}
E(R|s_1^{seller}) &= p_1^{buyer}(r_{success}^{seller} + \epsilon^{seller}) + p_3^{buyer}(r_{failure}^{seller} + \lambda^{seller}) \\
E(R|s_2^{seller}) &= p_1^{buyer}(goods + r_{failure}^{seller} + \lambda^{seller}) + p_3^{buyer}(goods + r_{failure}^{seller} + \lambda^{seller}) \\
&= goods + r_{failure}^{seller} + \lambda^{seller} \\
\because p_1^{buyer} + p_3^{buyer} &= 1 (\text{buyer が } p_2^{buyer} \text{ と } p_4^{buyer} \text{ が } 0 \text{ と見積もられているため}) \\
E(R|s_1^{buyer}) &= p_1^{seller}(goods + r_{success}^{buyer} + \epsilon^{buyer}) + p_2^{seller}(r_{failure}^{buyer} + \lambda^{buyer}) \\
E(R|s_3^{buyer}) &= p_1^{seller}(goods + r_{failure}^{buyer} + \lambda^{buyer}) + p_2^{seller}(r_{failure}^{buyer} + \lambda^{buyer}) \\
&= p_1^{seller} goods + r_{failure}^{buyer} + \lambda^{buyer} \\
\because p_1^{seller} + p_2^{seller} &= 1
\end{aligned}$$

#### 4.4.3 seller が誠実な戦略をとる条件

$$\begin{aligned}
E(R|s_1^{seller}) &> E(R|s_2^{seller}) \therefore p_1^{buyer}(r_{success}^{seller} + \epsilon) + p_2^{buyer}(r_{failure}^{seller} + \lambda) > goods + r_{failure}^{seller} + \lambda \\
\therefore p_1^{buyer}(r_{success}^{seller} + \epsilon) - p_1^{buyer}(r_{failure}^{seller} + \lambda) &> goods \therefore p_1^{buyer}(r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} + \epsilon - \lambda) > goods \\
\text{仮定より, } \epsilon > \lambda \text{ のため, } p_1^{buyer}(r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller}) &\geq goods \text{ を満たせばよい.} \\
0 < p_1^{buyer} \text{ を仮定するならば, } r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} &\geq \frac{goods}{p_1^{buyer}}
\end{aligned}$$

#### 4.4.4 buyer が誠実な戦略をとる条件

$$\begin{aligned}
E(R|s_1^{buyer}) &> E(R|s_3^{buyer}) \therefore p_1^{seller}(goods + r_{success}^{buyer}) + p_2^{seller} r_{failure}^{buyer} > p_1^{seller}(goods + r_{failure}^{buyer}) + \\
p_2^{seller} r_{failure}^{buyer} \therefore p_1^{seller}(r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer}) &> 0 \quad 0 < p_1^{seller} \text{ を仮定するならば, } r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} > 0 \\
\text{上記をまとめると, } 0 < p_1^{buyer} \text{ かつ } 0 < p_1^{seller} \text{ を仮定した上で, } r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} &\geq \frac{goods}{p_1^{buyer}} \text{ かつ} \\
r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} > 0 \text{ を満たせば, 「倫理ある商取引ゲーム」では不正を抑制することができる.}
\end{aligned}$$

#### 4.4.5 相手の誠実さ $P^{player}$

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  $r.w.^{player}$  を用いて次のように表せる.  $p_1^{player} \equiv \sum_{opportunity}^{players} r.w.^{opportunity} HonestyStrategyRate(player, opportunity)$

#### 4.4.6 最低信頼度 $T^{player}$

ただ「商取引システム」からは  $HonestyStrategyRate$  がわからないため, これでは  $p_1^{player}$  を求めることができない. そこで  $HonestyStrategyRate$  の代わりに  $ReportedSuccessRate$  を用いて同様の  $r.w.^{player}$  で重み付けした総和を最低信頼度  $T^{player}$  とおくことにする.

$$T^{player} \equiv \sum_{opportunity}^{players} r.w.opportunity \text{ReportedSuccessRate}(player, opportunity)$$

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

それゆえに、 $r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} \geq \frac{goods}{T^{buyer}} \geq \frac{goods}{p_1^{buyer}}$  となる。ここから「倫理ある商取引ゲーム」  
において不正が抑制される条件は次のように書き直せる。

$$0 < p_1^{buyer} \text{ かつ } 0 < p_1^{seller} \text{ を仮定した上で、 } r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} \geq \frac{goods}{T^{buyer}} \text{ かつ } r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} > 0$$

つまりは、この最低信頼度  $T^{player}$  をもちいることで、以下の条件を満たす  $(r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer})$   
の組を決定できる。

## 4.5 倫理ある商取引システムの詳細

「倫理ある商取引ゲーム」においては、最低信頼度  $T^{player}$  を用いた上記の条件式を満たせば、  
不正を防止することが可能になる。ただ、上記の条件のみでは「商取引システム」から保有通貨の  
変化量の組  $(r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer})$  を一意に決定できないので、いくつかの条件を追加  
する。

### 4.5.1 取引成功前後の残高の変化

商取引成功前後では *buyer* は商品 *goods* の価格 *price* だけ残高が減り *seller* は *price* だけ残高が  
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。

$$r_{success}^{seller} = price \quad r_{success}^{buyer} = -price \quad r_{success}^{seller} + r_{success}^{buyer} = 0$$

### 4.5.2 エスクロー係数 E

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*  
とにおいて考え、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)

$$EscrowCost \equiv (r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer}) + (r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller}) = E \cdot price$$

### 4.5.3 負担比率

ここで問題となるのは *EscrowCost* を求めるための *seller* と *buyer* の負担比率をどのようにし  
て決定するかである。本稿では最低信頼度  $T^{player}$  を用いてこの負担比率を決定することとする。

$$(r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer}) : (r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller}) = w(T^{buyer}) : w(T^{seller})$$

ここで最低信頼度が高い *player* の方が負担比率が小さくなるように責任比重関数  $w(x)$  は値域  
 $0 \leq x \leq 1$  において  $w'(x) > 0$  を満たすものとする。

### 4.5.4 責任比重関数 $w(x)$

本稿では負担比重関数は恒等写像  $w(x) = x$  とする。



#### 4.5.5 ReputationWeights

最低信頼度  $T^{player}$  を求めるにあたって  $r.w.^{opportunity}$  を決定する必要がある。  $r.w.^{opportunity}$  は誠実さ  $T_1^{player}$  を求める際に  $ReportedSuccessRate(player, opportunity)$  に係る任意の重みである。これはつまり任意の  $player$  が誠実な戦略をとる主観的確率を考える際に、  $player$  と  $opportunity$  の間であった過去の商取引での報告された成功率をどの程度信じるかである。仮に  $player$  と  $opportunity$  の間で信頼関係があれば  $ReportedSuccessRate$  は 1 になる。なので「商取引システム」の参加者数  $n$  が特定できる場合は  $\frac{1}{n}$  が妥当だろう。逆に不特定多数であり、同一の意志によって複数のプレイヤーが動いている場合は、保有している通貨量  $b^{opportunity}$  の全体の通貨の総量に占める割合が良いだろう。

$$r.w.^{opportunity} \equiv \frac{b^{opportunity}}{\sum_i^{players} b^i}$$

#### 4.5.6 EscrowCost の分配

「失敗」が報告されたときに失われる  $EscrowCost$  は消滅するのではなく参加者に分配する。これは全体の通貨量の減少によって通貨の価値が上がって商品価格が下がるという経済原理が生じ、インセンティブ設計が複雑化するのを防ぐためである。そこで  $EscrowCost$  として失われた通貨は任意の重み  $e.w.^{player}$  ( $\sum_{player}^{players} e.w.^{player} = 1$ ) を用いて分配し「商取引ゲーム」の前後で全体の通貨量を等しくする。

#### 4.5.7 EscrowWeights

$EscrowCost$  の分配に関しては「商取引システム」に参加している各プレイヤーの通貨の保有率に応じて分配する。  $seller$  と  $buyer$  を含んでいるのは、仮に  $seller$  と  $buyer$  以外のすべてのプレイヤーで分配した場合、  $seller$  もしくは  $buyer$  は結託する別のプレイヤーに保有する通貨の一部を一時的に預けることで、その分だけ  $EscrowCost$  の負担を軽減することが可能になるためである。そこで本稿では任意の重み  $e.w.^{player}$  を以下のように定義する。

$$e.w.^{player} \equiv \frac{b^{player}}{\sum_{escrow}^{players} b^{escrow}}$$

#### 4.5.8 謎の条件

$$\frac{w(T_1^{buyer})E \cdot price}{w(T_1^{buyer}) + w(T_1^{seller})} \geq \frac{price}{T^{buyer}} \geq \frac{goods}{p_1^{buyer}}$$

上記の条件式から  $\frac{price}{T^{buyer}}$  でうまくいくはずだったが何故かうまく行かず、  $\frac{price}{\min(T^{buyer}, T^{seller})}$  をもちいたらうまくいったのでこちらを採用することとした。  $p^{buyer}$  と  $P_1^{player}$  の関係性に問題があるためだと思われる。

$$\frac{w(T_1^{buyer})E \cdot price}{w(T_1^{buyer}) + w(T_1^{seller})} \geq \frac{price}{\min(T^{buyer}, T^{seller})}$$

#### 4.5.9 残高の変化量の組 ( $r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer}$ )

上記の条件群を用いて残高の変化量の組 ( $r_{success}^{seller}, r_{failure}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{buyer}$ ) を決定する。

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

$$\begin{aligned}
r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} &= \frac{w(T_1^{buyer})E \cdot price}{w(T_1^{buyer}) + w(T_1^{seller})} \geq \frac{price}{T^{buyer}} \\
r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} &= \frac{w(T_1^{seller})E \cdot price}{w(T_1^{buyer}) + w(T_1^{seller})} \geq 0 \\
\frac{w(T^{buyer})E \cdot price}{w(T^{buyer}) + w(T^{seller})} &= \frac{price}{\min(T^{buyer}, T^{seller})} \\
E &= \frac{w(T^{buyer}) \cdot \min(T^{buyer}, T^{seller})}{w(T^{buyer}) \cdot \min(T^{buyer}, T^{seller})} \\
r_{success}^{seller} - r_{failure}^{seller} &= \frac{price}{\min(T^{buyer}, T^{seller})} \\
r_{success}^{buyer} - r_{failure}^{buyer} &= \frac{w(T^{seller}) \cdot price}{w(T^{buyer}) \cdot \min(T^{buyer}, T^{seller})} \\
r_{success}^{seller} &= price \cdot r_{success}^{buyer} = -price \cdot r_{failure}^{seller} = price \cdot \left(1 - \frac{1}{\min(T^{buyer}, T^{seller})}\right) r_{failure}^{buyer} = -price \cdot \\
&\left(\frac{T^{seller}}{T^{buyer} \cdot \min(T^{buyer}, T^{seller})} + 1\right)
\end{aligned}$$

## 4.6 実験方法

提案手法を用いることで不正が防止されるかどうかを検証するためにコンピューターシミュレーションを用いた実験を行う。この実験では  $(s^{seller_1}, s_2^{seller})$  と  $(s_1^{buyer}, s_2^{buyer}, s_3^{buyer}, s_4^{buyer})$  から任意の戦略組をもつエージェント (全 8 通り) を 10 機用意して下記の試行を繰り返す。試行ごとに過去 100 回分の「真の商取引の成功率 (TrueSuccessRate)」と「商取引システム」に「報告された成功率 (ReportedSuccessRate)」を記録する。

① 10 機のエージェントからランダムに *seller* と *buyer* を決定し「商取引ゲーム」を行う。② 残高の変化量の組  $(r_{success}^{seller}, r_{success}^{buyer}, r_{failure}^{seller}, r_{failure}^{buyer})$  を算出し、「失敗」が報告された場合に *seller* と *buyer* の残高が 0 未満にならないかを判定する。ここで 0 未満になる場合は再度、①からやり直し、100 回連続で③ *seller* と *buyer* のエージェントは戦略から「商取引システム」に報告される結果を決定する。④「商取引システム」は報告された結果に応じてすべてのエージェントの残高を操作する。⑤試行回数が 10000 回になるまで①から④を繰り返す。

### 4.6.1 「倫理ある商取引ゲーム」での実験

「倫理ある商取引ゲーム」では *seller* と *buyer* がとりえる戦略は  $(s^{seller_1}, s_2^{seller})$  と  $(s_1^{buyer}, s_3^{buyer})$  のみであるため、これらを組み合わせた 4 パターンのエージェントを全体で 10 機用意して実験を行う。この 10 機の 4 パターンでの構成は 268 通りあるので、その全て場合で 1 回ずつ実験を行う。

### 4.6.2 「商取引ゲーム」での実験

「倫理ある商取引ゲーム」では *seller* と *buyer* がすべての戦略をとりえるため、8 パターンのエージェントを全体で 10 機用意して実験を行う。この 10 機の 4 パターンでの構成は 19960 通りあるので、モンテカルロ法を用いてランダムに重複ありの 1000 パターンの構成を生成し実験を行う。

## 4.7 評価

### 4.7.1 「倫理ある商取引ゲーム」での評価

「倫理ある商取引ゲーム」における 286 回の実験データを誠実なエージェントの数ごとに集計し、「商取引ゲーム」を 10000 万回を繰り返したときの真の成功率の平均をプロットしたのが Figure4.2

図 4.2: 「倫理ある商取引ゲーム」

図 4.3: 「商取引ゲーム」

である。誠実なエージェントが3機以下の場合には真の商取引の成功率の平均はいずれも0%であったが、5機以上の場合はいずれも100%に収束していた。

#### 4.7.2 「商取引ゲーム」での評価

同様に、通常の「商取引ゲーム」における1000件の実験データを誠実なエージェントの数ごとに集計し、「商取引ゲーム」を10000万回を繰り返したときの真の成功率の平均をプロットしたのがFigure4.3である。こちらでも誠実なエージェントが5機以上の場合には真の商取引の成功率の平均はいずれも99%を超えていた。また、「倫理ある商取引ゲーム」での実験に比べて4機の場合に比べてこちらの方が真の商取引の成功率の平均は高く、3機以下の場合でも完全に0%にはならなかった。

### 4.8 考察

「倫理ある商取引ゲーム」において誠実なエージェントが1体以下の場合、どの2体のエージェントで「商取引ゲーム」を行っても商取引は失敗する。そのため誠実なエージェントが1体以下の場合に商取引の成功率が0%になるのは納得である。しかし、今回の実験では2体もしくは3体の場合でも真の商取引の成功率の平均が0%になっている。この点は疑問である。また、今回のインセンティブ設計のアルゴリズムは「倫理ある商取引ゲーム」を前提としているにも関わらず、通常の「商取引ゲーム」の方が誠実なエージェントが4体のときの真の商取引の成功率の平均値が高いのは不可解である。これらの原因としては、確率的な試行であるにも関わらず「倫理ある商取引ゲーム」においては286パターンのエージェントの構成で1回づつしかサンプリングを行っていないことや、エージェントの構成が19960パターン考えられる通常の「商取引ゲーム」で1000回しか試行をしていないことなどが原因として考えられる。また、最低信頼度  $T^{player}$  と誠実さ  $P_1^{player}$  の関係性が  $p_1^{buyer}$  との関係性とすり替わっていることも原因として考えられる。実験方法やインセンティブ設計を修正する必要があると思われる。現状の結果から唯一いえることがあるとすれば、誠実なエージェントの割合が一定を超えると「商取引ゲーム」の不正行為が防止できるということである。

## 第5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仕様を決定すれば、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。

### 5.1 提案手法

外部の強制執行力として存在していた商取引システムを、各プレイヤー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実現させる。そのためには、各プレイヤーが商取引システムを所有してその役割を果たした上で、それぞれのプレイヤーの所有する「倫理ある商取引ゲーム」の章で扱った商取引システムの仕様どおりに動作している必要がある。商取引システムは各プレイヤーの初期の通貨の保有量と各時刻の商取引の記録から、一意に現在の時刻の各プレイヤーの通貨の保有量を計算するシステムであるため、商取引システムの動作が各プレイヤーで一致するには、初期の通貨の保有量と各時刻の商取引の記録が決定されていればよい。

そこで、各プレイヤーが記録している過去の商取引の結果を互いに確認し、差異が生じた場合に不正を報告する商取引契約の内容を考案することで、それを可能にする。具体的に下記のような商取引契約の内容を提案する。

#### 5.1.1 「商取引システム」を自己組織化する商取引契約

**step 1** 時刻  $t$  を 0 とする。

**step 2** プレイヤーの人数と各プレイヤーが初期に保有する通貨の量を任意に決定する。

**step 3**  $N$  人のプレイヤーが互いに全てのプレイヤーと seller と buyer の 2 つの役割で商取引ゲームを行う周期ある順序を決定する。この周期の長さは  $N \cdot N - 1$  となる。

**step 4** 時刻  $t$  を 1 進める。

**step 5** step3 で決定した順序に基づいて時刻  $t$  の seller と buyer を決定する。

**step 6** 自分が seller ならば、時刻  $\max\{0, t - n \cdot (n - 1)\}$  から時刻  $t$  までに報告された商取引ゲームの記録のうち、報告者がその商取引ゲームの記録の buyer と一致するものを全て buyer に送信する。

**step 7** 自分が *buyer* ならば、*seller* から受け取った商取引ゲームの記録をメモする。この際、記録する商取引の記録の報告者を *seller* に書き換える。

**step 8** 自分が *buyer* ならば、時刻  $\max\{0, t - 2 * n * (n - 1)\}$  から時刻  $\max\{0, t - n * (n - 1)\}$  までの各時刻について、メモされた商取引の記録のうち自身が報告者の記録はそのまま商取引システムに保存する。それ以外の記録は、「成功」と「失敗」のそれぞれの報告者について、自身の所有する商取引システムの通貨保有量の総和をとり、大きい方の結果を採用して商取引システムに保存する。

**step 9** 自身が *buyer* ならば、支持する商取引の記録を自身の所有する商取引システムに保存する。

**step 10** 自身が *buyer* ならば、時刻  $\max\{0, t - 2 * n * (n - 1)\}$  から時刻  $\max\{0, t - n * (n - 1)\}$  までの各時刻について、自身の所有する商取引システムに保存した商取引の記録と、報告者が *seller* であるメモされた商取引の記録を比較し、全てが一致する場合には「成功」を1つでも一致しない場合は「失敗」を全てのプレイヤーに報告する。

**step 11** 全てのプレイヤーは *buyer* から受けた商取引の記録をメモする。この際、商取引の記録の報告者を *buyer* に書き換える。

**step 12** step4 に戻る。

## 5.2 実験方法

下記の8種類のエージェントをランダムに8体用意する。時刻  $t = 1120$  まで下記の施行を繰り返し、各エージェントの保有する商取引システムが有効だと判断した過去56回の商取引について、報告された成功率と真の成功率を記録する。この施行を8000回ずつ繰り返しサンプリングを行う。

### 5.2.1 8種類のエージェント

- タイプ A...
- タイプ B...
- タイプ C...
- タイプ D...
- タイプ E...
- タイプ F...
- タイプ G...
- タイプ H...

## 5.3 評価

報告された成功率と真の成功率の両者が100%になっている場合を社会契約が成功した場合とし、タイプ A のエージェントと社会契約の成功に達した割合をプロットする。

## 第6章 おわりに

### 6.1 本論のまとめ

### 6.2 本論の課題

### 6.3 今後の研究

## 関連図書

[opt] 文献情報