

卒業論文 2021 年度 (令和 3 年)

ビザンチン将軍問題の解法を用いた
分散型の評判システムとしての社会契約

慶應義塾大学 環境情報学部
宮元 眺

ビザンチン将軍問題の解法を用いた
分散型の評判システムとしての社会契約

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、交渉理論や進化ゲーム理論を用いて研究がなされてきた (Verbeek Bruno Christopher 2020)[1] が、ほとんどの研究は、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 (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、「報告された約束の記録 (歴史) から各成員の評判 (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を行った場合であっても、合意された約束が必ず履行される状態に至ることがわかった。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. 評判システム, 3. ゲーム理論, 4. ビザンチン将軍問題

慶應義塾大学 環境情報学部
宮元 眺

<p>Social Contract as a Distributed Reputation System Using the Solution of the Byzantine Generals Problem</p>
--

Social contract is a process that gives rise to "the power to compel each member to fulfill an agreed promise" in a group. How this power arises has been studied using bargaining theory and evolutionary game theory (Verbeek Bruno Christopher 2020)[1], but Most studies implicitly assume the existence of an enforcement the distribution of gains in the game.

If we assume that this enforcement exists outside the group, it means that another social contract is in place, and thus we cannot fully explain the social contract. On the contrary, when the existence of external enforcement is not assumed, the social contract is established by using past history and social indicators determined from it (Binmore 2005). However, that study only explained the mechanism of internal enforcement in a reductionist way, and failed to clearly describe the behavior of the members that generate the enforcement. In this study. First, we assume the existence of "a system that records the results of promises reported by each member (history) and determines each member's reputation (social index) based on these records" as an external enforcement force. We considered the conditions under which the system would force each member to fulfill the agreed-upon promise. We have verified this distributed system using multi-agent simulation. We found that, depending on the composition of the members, it is possible to create a situation in which the agreed-upon promise is always fulfilled, even if some members behave in unexpected ways. This allows us to show that even in the absence of external enforcement, a social contract can be established depending on the composition of the members. The definition of history, the method of calculating social indicators, and the behavior of each member, which are necessary for the establishment of a social contract, can be clearly defined at a computable level. If there is ever a time in the future when a computer-based social contract between people is needed. I hope that this research will contribute in some way to its realization.

Keywords:

1. Social Contract, 2. Reputation System, 3. Game Theory, 4. Byzantine Generals Problem

Keio University Faculty of Environment and Information Studies
Nozomu Miyamoto

目次

第 1 章	序論	6
1.1	本研究の動機	6
1.2	本研究の貢献	7
1.3	本論の構成	7
第 2 章	背景	8
2.1	社会契約とは	8
2.2	スタグハントゲーム	8
2.3	機能主義的なアプローチ	8
2.4	交渉理論を用いたアプローチ	9
2.5	進化ゲーム理論を用いたアプローチ	9
2.6	限定合理性	9
2.7	強制執行力	9
2.8	外部の強制執行力	9
2.9	複雑系	10
2.10	自己組織化	10
2.11	ビザンチン将軍問題	10
2.12	署名されたメッセージによる解決策	10
2.12.1	仮定	11
2.12.2	関数 $choice(V)$	11
2.12.3	アルゴリズム $SM(m)$	11
2.13	マルチエージェントシミュレーション	11
第 3 章	問題提起	12
3.1	本論の問題提起	12
3.2	問題解決の要件	12
3.2.1	歴史を定義する	12
3.2.2	社会指標の決定方法を定義する	12
3.2.3	成員の振る舞いとして記述できる	12
第 4 章	仮説と検証方法	13
4.1	本論の仮説	13
4.2	検証方法	13
第 5 章	約束・評判ゲーム	15
5.1	補題 1	15
5.2	検証方法	15
5.3	評判システム	15

5.4	約束・評判ゲーム	15
5.4.1	展開型ゲーム	16
5.4.2	各プレイヤーの戦略	17
5.4.3	非協力戦略型ゲーム	17
5.5	不正が防止される条件	17
5.6	命題	18
5.7	証明	18
第 6 章	告発する約束・評判ゲーム	21
6.1	補題 2	21
6.2	提案手法	21
6.3	告発	21
6.4	告発する約束・評判ゲーム	21
6.4.1	各プレイヤーの戦略	22
6.4.2	各変数の定義	23
6.5	不正が防止される条件	23
6.5.1	各戦略のとられる確率	23
6.5.2	各戦略の期待利得	24
6.5.3	<i>promiser</i> が s_{p1} をとる条件	24
6.5.4	<i>reporter</i> が s_{r1} をとる条件	24
6.5.5	戦略組 (s_{p1}, s_{r1}) に帰結する条件	25
6.5.6	戦略 s_{p1} をとった割合と成功が報告される割合の関係	25
6.5.7	信頼度 P_i	25
6.5.8	最低信頼度 T_i	25
6.5.9	最低信頼度 T_i を用いた条件	26
6.6	評判システムの詳細	26
6.6.1	約束の価値 C	26
6.6.2	ReputationWeight	26
6.6.3	「成功」が報告された場合の「評判スコア」の変化	26
6.6.4	EscrowCost	27
6.6.5	EscrowCost の負担比率	27
6.6.6	EscrowCost の分配	27
6.7	実験方法	27
6.7.1	エージェントの種類	27
6.7.2	試行	28
6.8	評価	28
6.9	結論	29
第 7 章	分散型評判システム	30
7.1	補題 3	30
7.2	提案手法	30
7.3	分散型評判システム	30
7.3.1	仮定	30
7.3.2	成員の振る舞い	31

7.4	実験方法	31
7.4.1	実験用の時刻 t における成員の振る舞い	32
7.4.2	8種類のエージェント	32
7.4.3	事前の合意内容	33
7.4.4	試行	33
7.5	評価	33
第 8 章	結論	35
8.1	本論のまとめ	35
8.1.1	歴史	35
8.1.2	社会指標	35
8.1.3	成員の振る舞い	36
8.2	本論の課題	36
8.3	今後の研究	36

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。中世において、社会契約はホブズやロック、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ともに、ゲーム理論を用いて分析されるようになり、機能主義、交渉理論、進化ゲーム理論の3つのアプローチがなされている。[1]

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2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、非協力解(両者が野兎を狩る戦略をとる解)がナッシュ均衡になることが知られている。こうした囚人のジレンマゲームは社会契約が成立する原理を説明する鍵だと考えられている。[9]

2.3 機能主義的なアプローチ

Edna Ullmann-Margalit は、同様の囚人のジレンマゲームを持ち出し、道徳的な規範がプレイヤーが、自己利得の最大化のために非協力解に陥ることを妨げていることを説明した。[10] Mackie の研究においても、同様に、道徳の機能は合理性の失敗を防ぐことにあるとされる。[11] しかしながら、こうしたアプローチは道徳的な規範の機能を説明する一方で、なぜプレイヤーがその規範に従うのかについては説明がなされていない。

2.4 交渉理論を用いたアプローチ

交渉ゲーム理論を用いたアプローチとしては、Harsanyi 1955[12] や Rawls 1971[13]、Gauthier 1986[?] などが挙げられる。彼らは道徳的な規範に基づいた解も合理的な戦略決定によって生じていると考え、交渉ゲーム理論を用いて、どのような協力解が選択されるのかを説明しようとした。しかしながら、こうしたアプローチは、選択可能な社会契約の集合から、それぞれの交渉解の要件に沿った社会契約を選択されるのかを解明しようとするものであり、具体的にこういったプロセスでその解に至るのかはわからない。

2.5 進化ゲーム理論を用いたアプローチ

進化ゲーム理論を用いたアプローチは、道徳的な規範がどのようなプロセスで出現し維持されるのかを解明しようとしている。複数の研究で [14][15][16][17] 限定合理的なエージェントの間でも道徳的な規範が出現することが示されており、こうした規範は相互作用の繰り返しの中で主体の行動の意図しない副作用として生じるものだと考察されている。それゆえ、安定した規範が必ずしもパレート効率だとは限らず、交渉ゲーム理論を用いたアプローチが仮定しているような効率性と道徳性の関係は存在しないといえる。[1]

2.6 限定合理性

進化ゲーム理論においては、限定合理性が仮定された上で議論が進められる。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。[18] ゲーム理論においては、「自己利得を最大化する合理的なプレイヤー」という仮定の上では説明が困難だった実社会の協力的な行動を解明するために用いられている。[19] 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く。[20]

2.7 強制執行力

これまでの社会契約の研究では、強制執行力と呼ばれる「合意された利得の分配を強制的に執り行っている力」の存在が暗黙的に仮定されている。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。Rawls の「自然の義務」[13] や Harsanyi の「道徳的コミットメント」[12] などがこれに当たるとされる。[7]

2.8 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。Binmore は交渉ゲーム理論と進化ゲーム理論を用いてこの外部の強制執行力が存在する場合と存在しない場合の社会契約について分析し、下記のような結論を導き出した。[7]

外部の強制執行力が存在する場合、合理的なプレイヤーが合意する可能性のある契約はどれも無限回の繰り返しゲームの均衡結果となり得る。

外部の強制執行力が存在しない場合、過去の歴史が決定する社会指標を利用した平等主義的 (ロールズの) 交渉解によって解決される。

2.9 複雑系

複雑系とは相互に作用し合う可能性のある複数の要素によって構成されるシステムである。複雑系において、システム全体としての振る舞いは各構成要素の振る舞いによって決定論的に決まるが、その関係性が非線形的であり些細なパラメーターの変化で結果が大きく異なってしまうため、個々の振る舞いから全体の挙動を予測することは困難である。還元主義的なアプローチはシステム全体の振る舞いをシステムを分解することで理解しようとするのに対し、複雑系のアプローチは構成要素の振る舞いの変化とそれに伴うシステム全体の振る舞いの変化を観察することで理解しようとする。

本論では、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、彼らの振る舞いの変化が社会契約の成立にどのように影響をもたらすのかを解析する。

2.10 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現象である。2.5 節で述べたような道徳的な規範が生じる現象は、まさにこの自己組織化の例である。本論では、強制執行力を社会契約の複雑系の中で自己組織化された現象として設計する。設計にあたっては次節で紹介するビザンチン将軍問題とその解決策を用いる。

2.11 ビザンチン将軍問題

ビザンチン将軍問題とは、分散システムの構成し相互に通信しあうノード群において、それぞれのノードが本体の故障または故意によって偽の情報を伝達したり何も情報を伝達しない可能性がある場合に、全ての正常なノードが単一の値を共有することができるかを問う問題である。[21] 名称の通り、ビザンチン帝国の将軍たちが司令を共有する問題として記述されており、具体的には次のようなものである。

ビザンチン帝国の将軍たちが 1 つの都市を包囲しており、「攻撃」か「撤退」か合意したいと考えている。一部の将軍たちは「攻撃」を提案し、他は「撤退」を提案するかもしれないが、一部の将軍だけで攻撃すると失敗してしまう。将軍たちは、それぞれ離れた場所にいるため、メッセージを相互に送って自分の司令を伝えようとするが、全ての将軍が誠実とは限らず、中には裏切り者もいて意見を分断させようとするかもしれない。ここで自身の司令（「攻撃」か「撤退」）を伝えようとしている将軍を司令官、他の全ての将軍を副官としたとき、IC1 と IC2 を同時に達成する方法はあるだろうか。

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。

2.12 署名されたメッセージによる解決策

この問題にはいくつかの解決策が存在しているが、ここでは問題が提起されたの論文の中で取り上げられている「署名されたメッセージによる解決策」を紹介する。それによれば、裏切り者の人数を m としたとき、A1~A5 の 5 つの仮定の上で、 $m+1$ 人以上の将軍がいれば下記のアルゴリズムで IC1 と IC2 を同時に満たせることが証明されている。将軍の人数を n としたとき、 $i \in \{1, \dots, n-1\}$ であり、 $lieutenant_i$ は i 番目の将軍を指す。任意の値 w に対して、 $w : i$ は i 番目の将軍によって署名がついた値である。 $w : 0$ の場合は司令官の将軍の署名がついた値を指す。

2.12.1 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。

2.12.2 関数 $choice(V)$

関数 $choice(V)$ は集合 V を引数にとって司令 (「攻撃」か「撤退」) を返す関数である。

1. もし集合に単一の司令 v しか存在しなければ、 $choice(V) = v$ とする。
2. $choice(\emptyset) = RETREAT$ とする。 \emptyset は空集合。
3. もとの論文で抜けてるけど、 V が 2 つあるときは $RETREAT$?

2.12.3 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。

2.13 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そのエージェント達を内包する環境を定義し、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た社会契約の研究では、どのようなプロセスで道徳的な規範が生じ維持され、社会契約が成立するかについて議論されていたが、成員のどのような振る舞いによって、そのプロセスが進行しているのか記述することができなかった。その最もたる障害は強制執行力の存在である。先にも述べたとおり、強制執行力が集団の外部に存在する場合、それは別の社会契約の成立を意味する。それ故、こうした仮定の上で社会契約の説明を試みても問題が堂々巡りに陥ってしまい、完全な社会契約のモデルを構築には至れない。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なアプローチをとっており、社会契約に必要な歴史の定義や、社会指標の計算方法、成員達の具体的な振る舞いを記述することは困難である。

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、「合意された約束の履行を成員達に強制する力」を生じさせることが可能なのかという問いに取り組む。その過程で、どのように歴史を決定し、そこからどのように社会指標を導き出し、成員達がそれに基づいてどのように振る舞えば社会契約が成立する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 社会指標の決定方法を定義する

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 成員の振る舞いとして記述できる

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

我々は、先の問について、外部の強制執行力が存在しない場合でも、成員の振る舞いによって強制執行力を自己組織化することが可能であり、集団を構成する成員達の性質によっては、「成員達に合意された約束の履行を強制させる力」を生じさせることができると考えている。本論では、この仮説を示すために下記の3つ仮説を補題として扱い順に検証する。

補題1 成員の行動を観察できない外部の強制執行力が存在すると仮定した上で、完全に合理的な成員達に合意された約束を履行させるインセンティブ設計は不可能である。

補題2 成員の行動を観察できない外部の強制執行力が存在すると仮定した上で、集団を構成する成員達の性質によっては、成員達に合意された約束を履行させるインセンティブ設計が可能である。

補題3 外部の強制執行力が存在しない場合でも、成員の振る舞いによって強制執行力を自己組織化させることが可能である。

4.2 検証方法

本論では、補題1～3を順に検証することで、仮説を示す。その手順について概要をここで述べる。

まず、成員の行動を観察できない外部の強制執行力を「評判システム」と定義した上で議論を進め、補題1を示す。「評判システム」とは報告された約束の結果に基づいて各成員の評判スコアを決定するシステムである。また、そのシステムを用いた任意の約束を結ぶ2人の「約束・評判ゲーム」について考える。これは一方 (*promisor*) が約諾し、もう一方 (*reporter*) がその約束の結果 (「成功」か「失敗」) を「評判システム」に報告する非協力戦略型ゲームである。このゲームに参加するプレイヤーが完全に合理的な場合、両者がとりうる各戦略の利得を比較することで、彼らの約束が真に成功する (*promisor* が約束を履行し、*reporter* が「成功」を報告する) 条件を導く。全ての成員が完全に合理的な場合、「評判システム」が報告された約束の結果から、その条件を満たす評判スコアを決定することができないことを示す。

次に、補題1を踏まえて、全ての成員が約束を反故にされた場合に「失敗」を報告する「告発する約束・評判ゲーム」について考えることで補題2を示す。そして、補題1と同様に、成員がとりうる各戦略の利得を比較することで、この「告発する約束・評判ゲーム」において、彼らの約束が真に成功する条件を導く。「告発する約束・評判ゲーム」においては、「評判システム」が報告された約束の結果 (「成功」か「失敗」) から、その条件を満たす評判スコアを決定することができることを示す。その条件を満たす「評判システム」の詳細を定義し、戦略の限定されない通常の「約束・評判ゲーム」において、定義した評判システムが機能するかマルチエージェントシミュレーションを用いて検証する。その結果から、集団を構成する成員達の性質によっては、全ての約束が成功する状態に至ることを示す。

最後に、各成員が「評判システム」を所有している場合について考えることで、補題3を示す。ビザンチン將軍問題の署名付きの解決策を用いて、「評判システム」を各成員の振る舞いによる分散システムとして設計可能であることを示す。補題2の条件に基づいて実装された「評判システム」を同様に各成員の振る舞

いとして定義し、マルチエージェントシミュレーションを用いて検証する。その結果から、外部の強制執行力が存在しない場合でも、成員の振る舞いによって強制執行力を自己組織化させることが可能であり、集団を構成する成員達の性質によっては、全ての約束が成功する状態に至ることがわかる。

また、補題 3 の実験結果から、「評判システム」が成員達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機能し、集団を構成する成員達の性質によっては、「約束-評判ゲーム」で全ての約束が成功する状態に至ることが示される。これにより、先の仮説が立証され、社会契約の成立に必要となる歴史の定義や社会指標の決定方法、具体的な成員の振る舞い、その振る舞いに従う成員の人数と社会契約の成立の関係性を明らかにすることができる。

第5章 約束・評判ゲーム

本章では、4.1 節で定義した補題 1 を検証する。

5.1 補題 1

成員の行動を観察できない外部の強制執行力が存在すると仮定した上で、完全に合理的な成員達に合意された約束を履行させるインセンティブ設計は不可能である。

5.2 検証方法

成員の行動を観察できない外部の強制執行力として「評判システム」(5.3 節) の存在を仮定し、2 人の成員が、そのシステムを用いて約束を交わす「約束・評判ゲーム」(5.4) について考える。このとき、各成員が約束によって生じる価値と「評判スコア」の合計を最大化しようとする場合、約束が履行されるような「評判スコア」を「評判システム」から決定できないことを示す。

5.3 評判システム

「評判システム」とは、初期の各成員の「評判スコア」と報告された約束の記録に基づいて、各成員の「評判スコア」を決定するシステムである。約束の記録とは、約諾者が約束を履行したかについての情報であり、約諾者、報告者、結果(「成功」か「失敗」)からなる。このシステムから成員の行動を観察することはできないため、約諾者が真に約束を履行したか否かと報告された結果が同じとは限らない。このシステムは、「約束・評判ゲーム」(5.4 節) において、強制執行力としての役割を果たす。

5.4 約束・評判ゲーム

「約束・評判ゲーム」とは、約諾者 (*promisor*) と報告者 (*reporter*) の 2 人によって行われるゲームである。約諾者は 2 者間で合意された約束を履行する、もしくは反故にする。それに対して報告者は約束の結果(「成功」か「失敗」)を決定し、約束の記録を「評判システム」に報告する。

step1 *promisor* は合意された約束を履行する、もしくは反故にする。

step2 *reporter* は「成功」か「失敗」を「評判システム」に報告する。

5.4.1 展開型ゲーム

これは図 5.1 のゲームの木のような展開型ゲームとして表せる．各変数については下記の通りである。

step1 で *promisor* が約束を履行するか反故にするかと、**step2** で *reporter* が「成功」を報告するか「失敗」を報告するかで 4 つの結果がある。また、「評判システム」からは *promisor* と *reporter* の行動を観察できないため、**step2** での *reporter* の報告に基づいて *promisor* と *reporter* の「評判スコア」が決定しなければならない。それ故、①と③、②と④はそれぞれ c_k (k は任意) を除いて同じ利得でなくてはならない。

各変数の定義

c_{p1} … 約束が履行された場合の *promisor* の「評判スコア」の変化量以外の効用

c_{p2} … 約束が反故にされた場合の *promisor* の「評判スコア」の変化量以外の効用

c_{r1} … 約束が履行された場合の *reporter* の「評判スコア」の変化量以外の効用

c_{r2} … 約束が反故にされた場合の *reporter* の「評判スコア」の変化量以外の効用

r_{ps} … 「成功」が報告された場合の *promisor* の「評判スコア」の変化量

r_{pf} … 「失敗」が報告された場合の *promisor* の「評判スコア」の変化量

r_{rs} … 「成功」が報告された場合の *reporter* の「評判スコア」の変化量

r_{rf} … 「失敗」が報告された場合の *reporter* の「評判スコア」の変化量

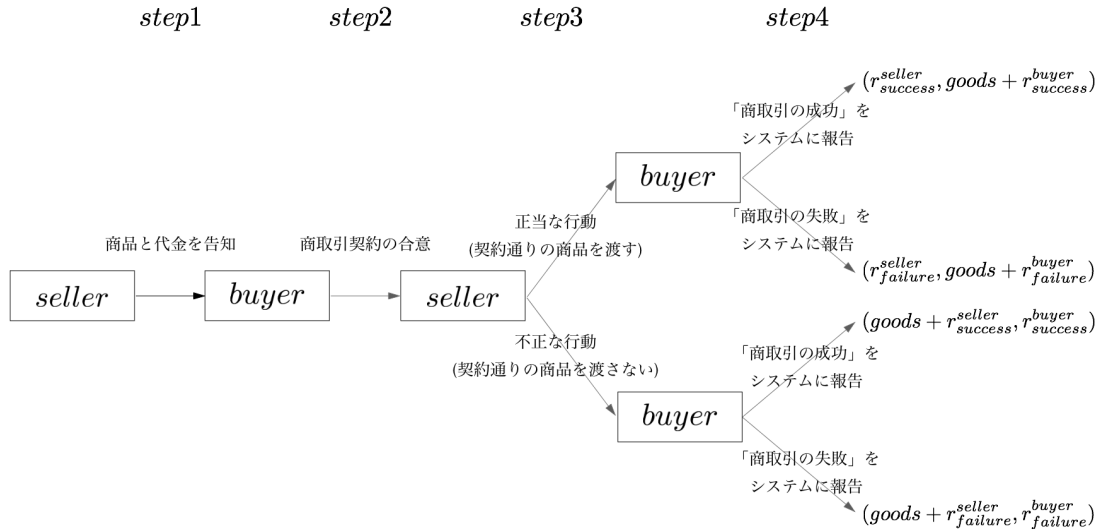


図 5.1: 「約束・評判ゲーム」のゲーム木

5.4.2 各プレイヤーの戦略

この展開型ゲームにおける *promisor* と *reporter* の行動は、下記のような戦略として表せる。

promisor の戦略

s_{p1} … 約束を履行する

s_{p2} … 約束を反故にする

reporter の戦略

s_{r1} … *promisor* が約束を履行した場合は「成功」、反故にした場合は「失敗」を報告する

s_{r2} … *promisor* が約束を履行した場合は「成功」、反故にした場合は「成功」を報告する

s_{r3} … *promisor* が約束を履行した場合は「失敗」、反故にした場合は「失敗」を報告する

s_{r4} … *promisor* が約束を履行した場合は「失敗」、反故にした場合は「成功」を報告する

5.4.3 非協力戦略型ゲーム

これらの戦略を用いて、先に述べた展開型ゲームは表 5.1 のような非協力戦略型ゲームとして書き換えられる。

		<i>Reporter</i>			
		s_{r1}	s_{r2}	s_{r3}	s_{r4}
<i>Promisor</i>	s_{p1}	$(c_{p1} + r_{ps}, c_{r1} + r_{rs})$	$(c_{p1} + r_{ps}, c_{r1} + r_{rs})$	$(c_{p1} + r_{pf}, c_{r1} + r_{rf})$	$(c_{p1} + r_{pf}, c_{r1} + r_{rf})$
	s_{p2}	$(c_{p2} + r_{pf}, c_{r2} + r_{rf})$	$(c_{p2} + r_{ps}, c_{r2} + r_{rs})$	$(c_{p2} + r_{pf}, c_{r2} + r_{rf})$	$(c_{p2} + r_{ps}, c_{r2} + r_{rs})$

表 5.1: 「約束・評判ゲーム」の利得票表

5.5 不正が防止される条件

表 5.1 より、「約束・評判ゲーム」において、約束が履行されるためには、*promisor* と *reporter* のとる戦略組が (s_{p1}, s_{r1}) もしくは (s_{p1}, s_{r2}) のいずれかになる必要がある。各プレイヤーが戦略 s をとったときの利得を R とし、その期待値を $E(R|s)$ とする。全てのプレイヤーが完全に合理的な場合、 (s_{p1}, s_{r1}) か (s_{p1}, s_{r2}) のいずれかの戦略組に帰着させるためには、

$$\text{条件① } E(R|s_{p1}) > E(R|s_{p2}) \text{ かつ } E(R|s_{r1}) > \max\{E(R|s_{r2}), E(R|s_{r3}), E(R|s_{r4})\}$$

$$\text{条件② } E(R|s_{p1}) > E(R|s_{p2}) \text{ かつ } E(R|s_{r2}) > \max\{E(R|s_{r1}), E(R|s_{r3}), E(R|s_{r4})\}$$

のいずれかを満たす $(r_{ps}, r_{pf}, r_{rs}, r_{rf})$ の組を「評判システム」から決定できる必要がある。本章ではこれが不可能であることを示す。

5.6 命題

条件①か条件②のいずれかを満たす $(r_{ps}, r_{pf}, r_{rs}, r_{rf})$ の組を「評判システム」から決定することはできない。

5.7 証明

各プレイヤーが戦略 s_k をとる確率を p_k とする。

$$\begin{aligned} 0 &\leq p_k \leq 1 \\ p_{p1} + p_{p2} &= 1 \\ p_{r1} + p_{r2} + p_{r3} + p_{r4} &= 1 \end{aligned} \tag{5.1}$$

各戦略の期待利得

promisor と *reporter* の各戦略の期待利得は次のように表せる。

$$\begin{aligned} E(R|s_{p1}) &= p_{r1}(c_{p1} + r_{ps}) + p_{r2}(c_{p1} + r_{ps}) + p_{r3}(c_{p1} + r_{pf}) + p_{r4}(c_{p1} + r_{pf}) \\ &= c_{p1} + p_{r1}r_{ps} + p_{r2}r_{ps} + p_{r3}r_{pf} + p_{r4}r_{pf} \therefore (5.1) \end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\begin{aligned} E(R|s_{p2}) &= p_{r1}(c_{p2} + r_{pf}) + p_{r2}(c_{p2} + r_{ps}) + p_{r3}(c_{p2} + r_{pf}) + p_{r4}(c_{p2} + r_{ps}) \\ &= c_{p2} + p_{r1}r_{pf} + p_{r2}r_{ps} + p_{r3}r_{pf} + p_{r4}r_{ps} \therefore (5.1) \end{aligned} \tag{5.3}$$

$$E(R|s_{r1}) = p_{p1}(c_{r1} + r_{rs}) + p_{p2}(c_{r2} + r_{rf}) \tag{5.4}$$

$$E(R|s_{r2}) = p_{p1}(c_{r1} + r_{rs}) + p_{p2}(c_{r2} + r_{rs}) \tag{5.5}$$

$$E(R|s_{r3}) = p_{p1}(c_{r1} + r_{rf}) + p_{p2}(c_{r2} + r_{rf}) \tag{5.6}$$

$$E(R|s_{r4}) = p_{p1}(c_{r1} + r_{rf}) + p_{p2}(c_{r2} + r_{rs})$$

条件①が成り立たないことの証明

条件①が成り立たないことを示すために、その必要条件である下記の 2 つの条件について考える。

$$E(R|s_{r1}) > E(R|s_{r2}) \tag{5.7}$$

$$E(R|s_{r1}) > E(R|s_{r3}) \tag{5.8}$$

(5.7) を満たすためには、

$$\begin{aligned} E(R|s_{r1}) &> E(R|s_{r2}) \\ \therefore p_{p1}(c_{r1} + r_{rs}) + p_{p2}(c_{r2} + r_{rf}) &> p_{p1}(c_{r1} + r_{rs}) + p_{p2}(c_{r2} + r_{rs}) \therefore (5.4)(5.5) \\ \therefore p_{p2}r_{rf} - p_{p2}r_{rs} &> 0 \\ \therefore p_{p2}(r_{rf} - r_{rs}) &> 0 \end{aligned}$$

つまり、

$$p_{p2} > 0$$

かつ

$$0 > r_{rs} - r_{rf} \quad (5.9)$$

を満たす必要がある。

(5.8) を満たすためには、

$$\begin{aligned} E(R|s_{r1}) &> E(R|s_{r3}) \\ \therefore p_{p1}(c_{r1} + r_{rs}) + p_{p2}(c_{r2} + r_{rf}) &> c_{p2} + p_{r1}r_{pf} + p_{r2}r_{ps} + p_{r3}r_{pf} + p_{r4}r_{ps} \quad \because (5.4)(5.6) \\ \therefore p_{p1}r_{rs} + p_{p2}r_{rf} &> p_{p1}r_{rf} + p_{p2}r_{rf} \\ \therefore p_{p1}(r_{rs} - r_{rf}) &> 0 \end{aligned}$$

つまり、

$$p_{p1} > 0$$

かつ

$$r_{rs} - r_{rf} > 0 \quad (5.10)$$

を満たす必要がある。

ここで (5.9) と (5.10) を同時に満たすことはできないため、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

次に、条件②の必要条件である

$$E(R|s_{p1}) > E(R|s_{p2}) \quad (5.11)$$

について考える。

(5.11) を満たすためには、

$$\begin{aligned} E(R|s_{p1}) &> E(R|s_{p2}) \\ \therefore c_{p1} + p_{r1}r_{ps} + p_{r2}r_{ps} + p_{r3}r_{pf} + p_{r4}r_{pf} &> c_{p2} + p_{r1}r_{pf} + p_{r2}r_{ps} + p_{r3}r_{pf} + p_{r4}r_{ps} \\ \therefore c_{p1} + p_{r1}r_{ps} + p_{r4}r_{pf} &> c_{p2} + p_{r1}r_{pf} + p_{r4}r_{ps} \\ \therefore c_{p1} - c_{p2} + p_{r1}r_{ps} + p_{r4}r_{pf} + p_{r1}r_{pf} - p_{r4}r_{ps} &> 0 \\ \therefore p_{r1}(r_{ps} - r_{pf}) - p_{r4}(r_{ps} - r_{pf}) + c_{p1} - c_{p2} &> 0 \\ \therefore (p_{r1} - p_{r4})(r_{ps} - r_{pf}) + c_{p1} - c_{p2} &> 0 \\ \therefore (p_{r1} - p_{r4})(r_{ps} - r_{pf} + \frac{c_{p1} - c_{p2}}{p_{r1} - p_{r4}}) &> 0 \end{aligned}$$

を満たす必要がある。つまり,

$p_{r1} > p_{r4}$ のとき,

$$\begin{aligned} r_{ps} - r_{pf} + \frac{c_{p1} - c_{p2}}{p_{r1} - p_{r4}} &> 0 \\ \therefore r_{ps} - r_{pf} &> \frac{c_{p2} - c_{p1}}{p_{r1} - p_{r4}} \end{aligned}$$

$p_{r1} < p_{r4}$ のとき,

$$\begin{aligned} r_{ps} - r_{pf} + \frac{c_{p1} - c_{p2}}{p_{r1} - p_{r4}} &< 0 \\ \therefore r_{ps} - r_{pf} &< \frac{c_{p2} - c_{p1}}{p_{r1} - p_{r4}} \end{aligned}$$

を満たせばよい。

ここで、 $E(R|s_{r2}) > \max\{E(R|s_{r1}), E(R|s_{r3}), E(R|s_{r4})\}$ が成り立つと仮定する。

このとき全ての合理的なプレイヤーは戦略 s_{r2} をとり、必ず「成功」を報告するため、「評判システム」から p_{r1} と p_{r4} を推定することはできない。

ゆえに、「評判システム」の記録からは条件②を満たすような (r_{ps}, r_{pf}) の組を決定できない。

以上より、条件①と条件②のいずれかを満たす $(r_{ps}, r_{pf}, r_{rs}, r_{rf})$ の組を「評判システム」から決定することはできない。Q.E.D.

メモ：後で $c_{p1} - c_{p2} \neq 0$ の仮定を追加？

第6章 告発する約束・評判ゲーム

本章では、4.1 節で定義した補題 2 を検証する。

6.1 補題 2

成員の行動を観察できない外部の強制執行力が存在すると仮定した上で、集団を構成する成員達の性質によっては、成員達に合意された約束を履行させるインセンティブ設計が可能である。

6.2 提案手法

不正行為にあった場合に必ず「失敗」を報告する行動を「告発」と呼び、「告発」するプレイヤーのみが参加する「約束・評判ゲーム」を「告発する約束・評判ゲーム」とする。この「告発する約束・評判ゲーム」において、不正が防止される条件を導き出す。そして、その条件を満たす「評判システム」を通常の「約束・評判ゲーム」に適用し、様々な戦略をとるエージェントをランダムに用意したマルチエージェントシミュレーションを行ことで、「告発」するプレイヤーが一定以上存在していれば成員達に合意された約束を履行させることができることを示す。

6.3 告発

5.7 節の検証では、「評判システム」は *reporter* が戦略 s_{r1} と s_{r4} をとる確率 p_{r1} と p_{r4} を推定できないため、不正を防止する「評判スコア」の変化量の組 $(r_{ps}, r_{pf}, r_{ps}, r_{pf})$ を決定できなかった。これは *reporter* が報告する約束の結果と真の約束の結果が一致している保証がないためである。そこで、本論では、*promiser* が約束を反故にした場合に「失敗」を報告する行動を「告発」とする。この行動をとる成員が多数いれば、先の確率を近似することが可能であると考えられる。

6.4 告発する約束・評判ゲーム

「告発」する成員のみで行われる「約束・評判ゲーム」を「告発する約束・評判ゲーム」とする。このゲームにおいては、step1 で *promisor* が約束を履行しなかった場合、*reporter* は必ず「失敗」を報告するため、図 6.1 のゲームの木のような展開型ゲームとして表せる。また、5.4.2 節で示した *reporter* の戦略のうち s_{r2} と s_{r4} がとられないため、非協力戦略型ゲームとして表したときの利得は表 6.1 のようになる。注意すべき点としては、報告された約束の結果が次回以降のゲームで意味のある情報となるため、「成功」と「失敗」が報告された場合の将来の期待利得 ϵ と λ について考慮する必要がある。

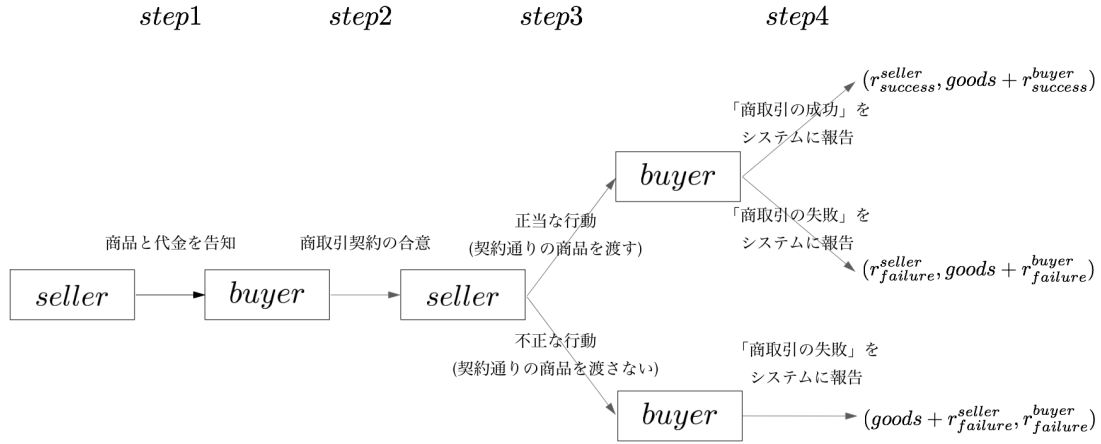


図 6.1: 「告発する約束・評判ゲーム」のゲーム木

		<i>reporter</i>	
		s_{r1}	s_{r3}
<i>promisor</i>	s_{p1}	$(c_{p1} + r_{ps} + \epsilon_p, c_{r1} + r_{rs} + \epsilon_r)$	$(c_{p1} + r_{pf} + \lambda_p, c_{r1} + r_{rf} + \lambda_r)$
	s_{p2}	$(c_{p2} + r_{pf} + \lambda_p, c_{r2} + r_{rf} + \lambda_r)$	$(c_{p2} + r_{pf} + \lambda_p, c_{r2} + r_{rf} + \lambda_r)$

表 6.1: 「告発する約束・評判ゲーム」の利得表

6.4.1 各プレイヤーの戦略

この展開型ゲームにおける *promisor* と *reporter* の行動は、下記のような戦略として表せる。

promisor の戦略

s_{p1} … 約束を履行する

s_{p2} … 約束を反故にする

reporter の戦略

s_{r1} … *promisor* が約束を履行した場合は「成功」、反故にした場合は「失敗」を報告する

s_{r3} … *promisor* が約束を履行した場合は「失敗」、反故にした場合は「失敗」を報告する

6.4.2 各変数の定義

ϵ_p … 「成功」が報告された場合の *promisor* の将来期待利得

ϵ_r … 「成功」が報告された場合の *reporter* の将来期待利得

λ_p … 「失敗」が報告された場合の *promisor* の将来期待利得

λ_r … 「失敗」が報告された場合の *reporter* の将来期待利得

c_{p2} … 約束が反故にされた場合の *promisor* の「評判スコア」の変化量以外の効用

c_{p1} … 約束が履行された場合の *promisor* の「評判スコア」の変化量以外の効用

c_{r2} … 約束が反故にされた場合の *reporter* の「評判スコア」の変化量以外の効用

c_{r1} … 約束が履行された場合の *reporter* の「評判スコア」の変化量以外の効用

c_{r2} … 約束が反故にされた場合の *reporter* の「評判スコア」の変化量以外の効用

r_{ps} … 「成功」が報告された場合の *promisor* の「評判スコア」の変化量

r_{pf} … 「失敗」が報告された場合の *promisor* の「評判スコア」の変化量

r_{rs} … 「成功」が報告された場合の *reporter* の「評判スコア」の変化量

r_{rf} … 「失敗」が報告された場合の *reporter* の「評判スコア」の変化量

6.5 不正が防止される条件

表 5.1 より、「告発する約束・評判ゲーム」において、約束が履行され「成功」が報告されるためには、*promisor* と *reporter* のとる戦略組が (s_{p1}, s_{r1}) になる必要がある。各プレイヤーが戦略 s をとったときの利得を R とし、その期待値を $E(R|s)$ とする。全てのプレイヤーが完全に合理的な場合、戦略組 (s_{p1}, s_{r1}) に帰着させるためには、

$$\text{条件③ } E(r|s_{p1}) > E(r|s_{p2}) \text{ かつ } E(r|s_{r1}) > E(r|s_{r3})$$

を満たす「評判スコア」の変化量の組 $(r_{ps}, r_{pf}, r_{rs}, r_{rf})$ を「評判システム」から決定できる必要がある。

6.5.1 各戦略のとられる確率

各プレイヤーが戦略 s_k をとる確率を p_k とする。

$$0 \leq p_k \leq 1$$

$$p_{p1} + p_{p2} = 1 \tag{6.1}$$

$$p_{r1} + p_{r3} = 1 \tag{6.2}$$

6.5.2 各戦略の期待利得

promisor と *reporter* の各戦略の期待利得は次のように表せる。

$$\begin{aligned} E(R|s_{p1}) &= p_{r1}(c_{p1} + r_{ps} + \epsilon_p) + p_{r3}(c_{p1} + r_{pf} + \lambda_p) \\ &= c_{p1} + p_{r1}(r_{ps} + \epsilon_p) + p_{r3}(r_{pf} + \lambda_p) \because (6.2) \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} E(R|s_{p2}) &= p_{r1}(c_{p2} + r_{pf} + \lambda_p) + p_{r3}(c_{p2} + r_{pf} + \lambda_p) \\ &= c_{p2} + r_{pf} + \lambda_p \because (6.2) \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$E(R|s_{r1}) = p_{p1}(c_{r1} + r_{rs} + \epsilon_r) + p_{p2}(c_{r2} + r_{rf} + \lambda_r) \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} E(R|s_{r3}) &= p_{p1}(c_{r1} + r_{rf} + \lambda_r) + p_{p2}(c_{r2} + r_{rf} + \lambda_r) \\ &= p_{p1}c_{r1} + p_{p2}c_{r2} + r_{rf} + \lambda_r \because (6.1) \end{aligned} \quad (6.6)$$

6.5.3 *promiser* が s_{p1} をとる条件

$E(R|s_{p1}) > E(R|s_{p2})$ を満たすためには、

$$\begin{aligned} E(R|s_{p1}) &> E(R|s_{p2}) \\ \therefore c_{p1} + p_{r1}(r_{ps} + \epsilon_p) + p_{r3}(r_{pf} + \lambda_p) &> c_{p2} + r_{pf} + \lambda_p \\ \therefore p_{r1}(r_{ps} + \epsilon_p) + (p_{r3} - 1)(r_{pf} + \lambda_p) &> c_{p2} - c_{p1} \\ \therefore p_{r1}(r_{ps} + \epsilon_p) - (1 - p_{r3})(r_{pf} + \lambda_p) &> c_{p2} - c_{p1} \\ \therefore p_{r1}(r_{ps} + \epsilon_p) - p_{r1}(r_{pf} + \lambda_p) &> c_{p2} - c_{p1} \because (6.2) \\ \therefore p_{r1}(r_{ps} - r_{pf} + \epsilon_p - \lambda_p) &> c_{p2} - c_{p1} \end{aligned} \quad (6.7)$$

を満たせばよい。

6.5.4 *reporter* が s_{r1} をとる条件

$E(R|s_{r1}) > E(R|s_{r3})$ を満たすためには、

$$\begin{aligned} E(R|s_{r1}) &> E(R|s_{r3}) \\ \therefore p_{p1}(c_{r1} + r_{rs} + \epsilon_r) + p_{p2}(c_{r2} + r_{rf} + \lambda_r) &> p_{p1}c_{r1} + p_{p2}c_{r2} + r_{rf} + \lambda_r \\ \therefore p_{p1}(r_{rs} + \epsilon_r) + p_{p2}(r_{rf} + \lambda_r) &> r_{rf} + \lambda_r \\ \therefore p_{p1}(r_{rs} + \epsilon_r) + (p_{p2} - 1)(r_{rf} + \lambda_r) &> 0 \\ \therefore p_{p1}(r_{rs} + \epsilon_r) - (1 - p_{p2})(r_{rf} + \lambda_r) &> 0 \\ \therefore p_{p1}(r_{rs} + \epsilon_r) - p_{p1}(r_{rf} + \lambda_r) &> 0 \because (6.1) \\ \therefore p_{p1}(r_{rs} - r_{rf} + \epsilon_r - \lambda_r) &> 0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

を満たせばよい。

6.5.5 戦略組 (s_{p1}, s_{r1}) に帰結する条件

$p_{r1} > 0$ かつ $p_{p1} > 0$ かつ $\epsilon_p > \lambda_p$ かつ $\epsilon_r > \lambda_r$ を仮定すると

$$r_{ps} - r_{pf} \geq \frac{c_{p2} - c_{p1}}{p_{r1}} \quad (6.9)$$

かつ

$$r_{rs} - r_{rf} \geq 0 \quad (6.10)$$

を満たせば、「告発する約束約束・評判ゲーム」で不正を防止することができる。

6.5.6 戦略 s_{p1} をとった割合と成功が報告される割合の関係

全ての成員は「告発」するため、任意の成員 i と j のこれまでの「約束・評判ゲーム」で s_{p1} をとってきた割合 $FulfillStrategyRate(i, j)$ と、「評判システム」に報告された約束の記録のうち $promisor$ が成員 i で $reporter$ が成員 j である記録の「成功」の割合 $ReportedSuccessRate(i, j)$ について、次の関係がいえる。

$$FulfillStrategyRate(i, j) \geq ReportedSuccessRate(i, j) \quad (6.11)$$

6.5.7 信頼度 P_i

ここで、成員 i が $promisor$ のときに s_{p1} をとる確率 p_{p1} を成員 i の信頼度 P_i と定義し、 P_i を $FulfillStrategyRate(i, j)$ と $\sum_k^{\{1, 2, \dots, n\}} w_k = 1$ を満たす任意の重み w_k ($k \in \{1, 2, \dots, n\}$) を用いた荷重総和として次のように表す。

$$P_i \equiv p_{p1} \quad (6.12)$$

$$\equiv \sum_j^{\{1, 2, \dots, n\}} w_j \cdot FulfillStrategyRate(i, j) \quad (6.13)$$

6.5.8 最低信頼度 T_i

また、 $ReportedSuccessRate(i, j)$ に、同じ重み w_k を用いた荷重総和を最低信頼度 T_i と定義する。

$$T_i \equiv \sum_j^{\{1, 2, \dots, n\}} w_j \cdot ReportedSuccessRate(i, j) \quad (6.14)$$

6.5.9 最低信頼度 T_i を用いた条件

(6.11) より、 $P_i \geq T_i$ がいえるため、(6.9) について

$$\begin{aligned} r_{ps} - r_{pf} &\geq \frac{c_{p2} - c_{p1}}{T_i} \\ &\geq \frac{c_{p2} - c_{p1}}{P_i} = \frac{c_{p2} - c_{p1}}{p_{r1}} \end{aligned} \quad (6.15)$$

がいえる。

「評判システム」から最低信頼度 T_i は既知のため、 $p_{r1} > 0$ かつ $p_{p1} > 0$ かつ $\epsilon_p > \lambda_p$ かつ $\epsilon_r > \lambda_r$ を仮定した上で、「告発する信用・評判ゲーム」において、不正を防止する $(r_{ps}, r_{pf}, r_{rs}, r_{rf})$ の組を「評判システム」から決定できる。

6.6 評判システムの詳細

本節ではシミュレーションに用いる「評判システム」の仕様の詳細を紹介する。完全な実装については、GitHub のソースコードを参照。

6.6.1 約束の価値 C

$$C \equiv 1 \quad (6.16)$$

$$= c_{p2} - c_{p1} \quad (6.17)$$

$$= c_{r1} - c_{r2} \quad (6.18)$$

6.6.2 ReputationWeight

最低信頼度 T_i を求めるため、 $ReportedSuccessRate(i, j)$ の荷重総和に用いる重み w_k を定義する。この重み w_k は、任意の成員 i が戦略 s_{p1} をとる確率 p_{p1} を推定する際に、成員 i と他の成員 j における $ReportedSuccessRate(i, j)$ をどの程度信頼するかを表している。本実験では、成員 j の「評判スコア」が全体に占める割合を $ReputationWeight w_j$ と定義する。任意の成員 k の「評判スコア」を b_k としたとき、 w_k は次のように表せる。 $(n$ は成員の人数)

$$w_k \equiv \frac{b_k}{\sum_{k \in \{1, 2, \dots, n\}} b_k}$$

6.6.3 「成功」が報告された場合の「評判スコア」の変化

$reporter$ が「成功」を報告した場合、 $reporter$ は約束の価値 C だけ減り、 $promisor$ は C だけ増加するものとする。

$$r_{ps} = C \quad (6.19)$$

$$r_{rs} = -C \quad (6.20)$$

$$r_{ps} + r_{rs} = 0 \quad (6.21)$$

6.6.4 EscrowCost

「失敗」が報告されたとき、*promisor* と *reporter* が失う「評判スコア」の合計を *EscrowCost* とする。約束の価値 C にエスクロー係数 E を掛けたものとする。

$$EscrowCost \equiv (r_{rs} - r_{rf}) + (r_{ps} - r_{pf}) \quad (6.22)$$

$$= E \cdot C \quad (6.23)$$

6.6.5 EscrowCost の負担比率

成員 j が *promisor*、成員 k が *reporter* として「約束・評判ゲーム」を行うとき、*EscrowCost* の負担比率は両者の最低信頼度 T_i を用いる。

$$(r_{rs} - r_{rf}) : (r_{ps} - r_{pf}) = T_k : T_j \quad (6.24)$$

6.6.6 EscrowCost の分配

「失敗」が報告されたときに *EscrowCost* が消失すると、「評判スコア」の総量が下がり、約束の価値 C 総量を一定に保つために、*promisor* と *reporter* 以外の全てのプレイヤーに、*ReputationWeight* に応じて *EscrowCost* を分配する。*promisor* と *reporter* を含まないのは、分配によるインセンティブ設計への影響をなくすためである。

6.7 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「評判システム」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。

6.7.1 エージェントの種類

下記の A H の 8 タイプのエージェントを用意する。

A 約束を履行し、*promisor* が約束を履行したとき「成功」、反故にしたとき「失敗」を報告する。

B 約束を履行し、*promisor* が約束を履行したとき「成功」、反故にしたとき「成功」を報告する。

- C 約束を履行し、*promisor* が約束を履行したとき「失敗」、反故にしたとき「成功」を報告する。
- D 約束を履行し、*promisor* が約束を履行したとき「失敗」、反故にしたとき「失敗」を報告する。
- E 約束を反故にし、*promisor* が約束を履行したとき「成功」、反故にしたとき「失敗」を報告する。
- F 約束を反故にし、*promisor* が約束を履行したとき「成功」、反故にしたとき「成功」を報告する。
- G 約束を反故にし、*promisor* が約束を履行したとき「失敗」、反故にしたとき「成功」を報告する。
- H 約束を反故にし、*promisor* が約束を履行したとき「失敗」、反故にしたとき「失敗」を報告する。

6.7.2 試行

step 1 時刻 t を 0 とする。

step 2 「評判システム」の各エージェントの初期の「評判スコア」を 8 とする。

step 3 全てのエージェントが *promisor* と *reporter* として 1 度ずつ総当りする順序を決定する。(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、*promisor* と *reporter* を決定する。

step 6 「評判システム」は「成功」と「失敗」が報告された場合の *promisor* と *reporter* の「評判スコア」を計算する。

step 7 *promisor* は自身の戦略に基づいて約束を履行するか反故にする。

step 8 *reporter* は自身の戦略と step 6 の *promisor* の行動に基づいて結果を決定する。

step 9 *reporter* は決定した結果を「評判システム」に報告する。

step 10 「評判システム」は step 6 で計算した「評判スコア」がいずれの場合にも 0 未満にならない場合、*reporter* から報告された結果を記録する。

step 11 step 6 で計算した「評判スコア」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 回の約束・評判ゲームにおいて、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」を記録する。

6.8 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 6.2 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。

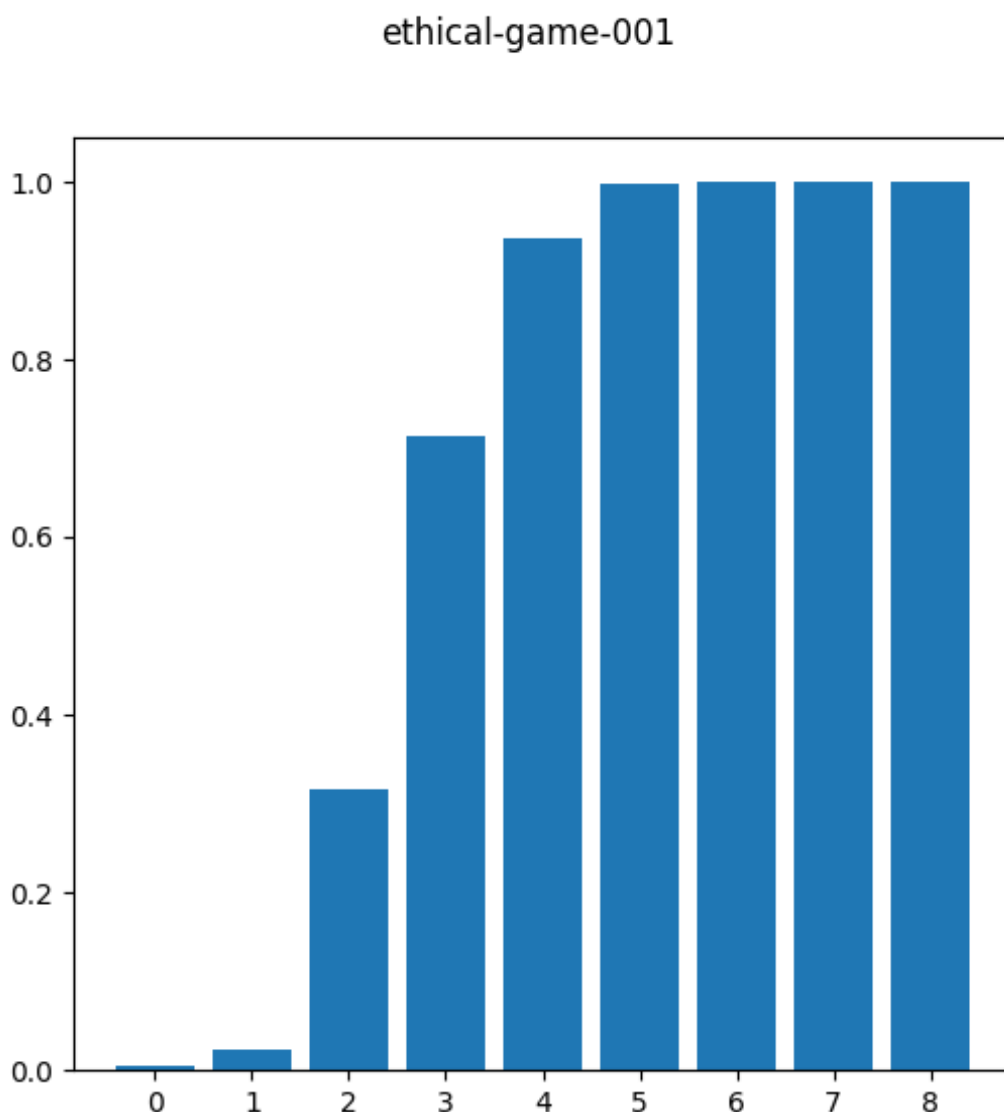


図 6.2: 誠実なエージェントの数と「不正防止の成功」に至った割合

6.9 結論

実験とその評価から、「告発」という限定合理性を仮定した上で「評判スコア」の変化量を決定することで、成員の構成によっては「約束・評判ゲーム」において不正を防止することができるとわかった。これによって、成員の行動を観察できない外部の強制執行力が存在すると仮定した上で、集団を構成する成員達の性質によっては、成員達に合意された約束を履行させられることがわかった。また、成員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 6.2 のとおりである。

第7章 分散型評判システム

本章では、4.1 節で定義した補題 3 を検証する。

7.1 補題 3

外部の強制執行力が存在しない場合でも、成員の振る舞いによって強制執行力を自己組織化させることが可能である。

7.2 提案手法

各成員が「評判システム」を 1 つずつ所持している仮定する。補題 1・2 の検証で外部の強制執行力として存在していた「評判システム」をビザンチン将軍問題の署名付きの解法を用いて「分散型評判システム」として設計する。この「評判システム」を所持している成員達のふるまいを記述し、検証 2 の結果と同様の結果になることをマルチエージェントシミュレーションを用いて検証する。

7.3 分散型評判システム

「評判システム」は、各成員の初期の「評判スコア」と報告された各時刻の約束の記録から現時刻の各成員の「評判スコア」を決定するシステムである。各成員が「評判システム」を所有している場合、初期の「評判スコア」と各時刻の約束の記録が互いに共有されていれば、各成員の所有する「評判システム」の現時点の各成員の「評判スコア」は一致する。

7.3.1 仮定

仮定 1 送信されたすべてのメッセージは正しく到達する

仮定 2 メッセージの受信者は誰が送信したのかわかる

仮定 3 メッセージが届かないことを検知できる

仮定 4 誠実な成員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。

仮定 5 誰でも成員の署名の信憑性を検証することができる。

7.3.2 成員の振る舞い

- 事前の合意に基づいて、全ての成員の人数 n を決定する。
- 事前の合意に基づいて、各成員の初期の「評判スコア」 b_i, \dots, b_n を定義する。
- 事前の合意に基づいて、全ての成員が *promisor* と *reporter* のそれぞれの役割で総当たりする周期を定義する。(周期の長さは $n * (n - 1)$)
- 事前の合意に基づいて、「評判システム」を用意する。
- 事前の合意に基づいて、約束の内容を定義する。
- 各時刻 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。

時刻 t における成員の振る舞い

1. 事前に合意した周期から *promisor* と *reporter* を決定する。
2. *reporter* は時刻 $t - n(n - 1)$ に *promisor* と交わした約束の結果を決定する。 $t \leq n(n - 1)$ の場合、「成功」とする。
3. $V_i = \emptyset$ として初期化する。 $(\emptyset$ は空集合)
4. *reporter* は約束の結果を全ての成員に署名して送る。
5. 各 i について、
 - (a) もし $member_i$ が $v : 0$ という形式のメッセージを受け取り、まだ何の報告も受けていない場合は、
 - i. $member_i$ は V_i を v にする。
 - ii. $member_i$ は他のすべての成員にメッセージ $v : 0 : i$ を送ります。
 - (b) もし $member_i$ 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. $member_i$ は v を V_i に追加する。
 - ii. もし $k < m$ であれば、 $member_i$ 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。
6. 各 i について、 $member_i$ がこれ以上メッセージを受け取らない場合、 $member_i$ は $choice(V_i)$ を報告された結果とする。
7. 各 i について、 $member_i$ は報告された結果を自身の「評判システム」に記録する。
8. *reporter* は *promisor* と新たな約束を交わす。

7.4 実験方法

この「8種類のエージェント」から重複問わずランダムに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回の試行が行われるまで繰り返し、「報告された成功率」と「真の成功率」を記録する。

7.4.1 実験用の時刻 t における成員の振る舞い

1. 事前に合意した周期から *promisor* と *reporter* を決定する。
2. *reporter* は時刻 $t - n(n - 1)$ に *promisor* と交わした約束の結果を決定する。 $t \leq n(n - 1)$ の場合、「成功」とする。
3. $V_i = \emptyset$ として初期化する。 $(\emptyset$ は空集合)
4. *reporter* は約束の結果を全ての成員に署名して送る。
5. 各 i について、
 - (a) もし $member_i$ が $v : 0$ という形式のメッセージを受け取り、まだ何の報告も受けていない場合は、
 - i. $member_i$ は V_i を v にする。
 - ii. $member_i$ は他のすべての成員にメッセージ $v : 0 : i$ を送ります。
 - (b) もし $member_i$ 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. $member_i$ は v を V_i に追加する。
 - ii. もし $k < m$ であれば、 $member_i$ 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。
6. 各 i について、 $member_i$ がこれ以上メッセージを受け取らない場合、 $member_i$ は $choice(V_i)$ を報告された結果とする。
7. 各 i について、 $member_i$ は報告された結果を自身の「評判システム」に記録する。
8. 各 i について、TODO:上のビザンチン将軍問題で署名送っていないノードをうまく判別して、次に *promisor* になったときに失敗を報告できるようにする。
9. *reporter* は *promisor* と新たな約束を交わす。

7.4.2 8 種類のエージェント

A~H の 8 種類のエージェントを用意する。それぞれのエージェントは下記の性質に従う。(記述のない振る舞いについては「実験用の時刻 t における成員の振る舞い」に従う。)

- A 完全に「成員の振る舞い」に従うエージェント
- B 必ず「成功」を報告するエージェント
- C 真の約束のと逆の結果を報告するエージェント
- D 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、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、真の約束の結果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、必ず「失敗」を報告するエージェント

7.4.3 事前の合意内容

1. プレイヤー数 n を 8 とする。
2. 初期の各成員の「評判スコア」 b_i, \dots, b_n を全て 8 とし、各エージェントはそれに合意する。
3. 各時刻 t の *promisor* と *reporter* 組み合わせの周期を $(1, 2), (2, 1), \dots, (7, 8)$ とする。(周期の長さは 56)
4. 「評判システム」の詳細は検証 2 のものと同様とする。

7.4.4 試行

1. 現在の時刻 t を 0 とする。
2. 各エージェントは「事前の合意内容」に合意する。
3. 時刻 t を 1 進める。
4. 各エージェントはその特性に則って振る舞う。
5. 各エージェントの「評判システム」について、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。
6. 各エージェントの「評判システム」について、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。
7. 時刻 t が 1120 未満なら、step4 に戻る。
8. 各エージェントの「評判システム」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」して記録する。

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。

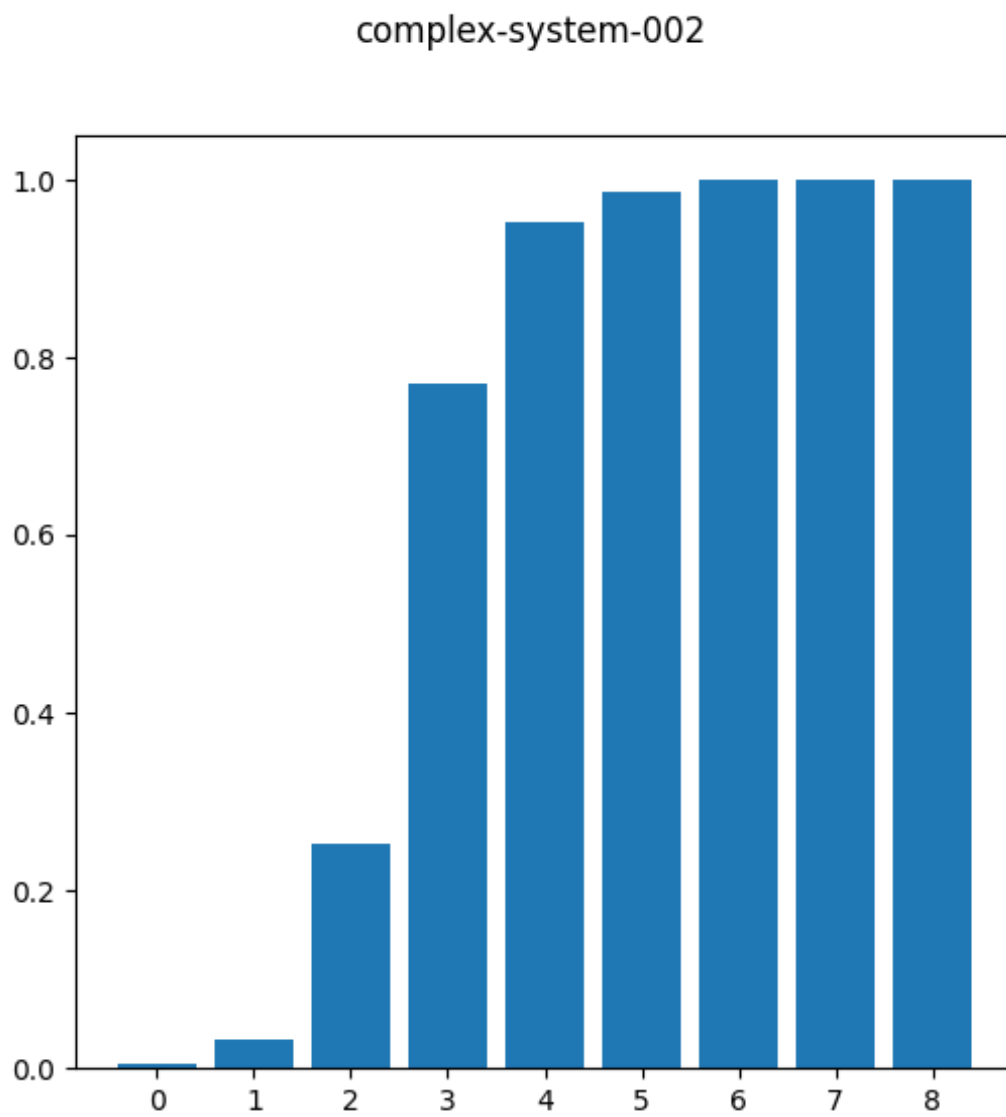


図 7.1: 誠実なエージェントの数と自己組織化に成功した割合

第8章 結論

8.1 本論のまとめ

仮定 0 外部に強制執行力が存在しない。

仮定 1 各成員は、他の成員の行動を観察できない。

仮定 2 各成員は、成員の人数について、事前に合意している。

仮定 3 各成員は、成員の社会指標について、事前に合意している。

仮定 4 各成員は、各時刻 t の約諾者と報告者について、事前に合意している。

仮定 5 各成員は、同期された時刻 t を知ることができる。

強制執行力が存在せず、各成員が他の成員の行動を観察できない場合であっても、上記の 5 つの仮定の上で、歴史と社会指標に基づいた成員の振る舞いを行えば、時間の進行とともに合意された約束を履行しない成員は排除され、事前に合意された約束が守られる状態に至る (社会契約が成立する) ことがわかった。誠実な成員の人数と社会契約の成立の関係性については図が示す限りである。

また、ここまでの検証の仮定から歴史と社会指標、各成員の振る舞いについて次のように記すことができる。

8.1.1 歴史

社会契約に最低限必要となる歴史とは、各時刻 t における約束の記録の集合である。

約束の記録

時刻 … 約束の記録が報告された時刻

約諾者 … 約束を履行する成員の ID

報告者 … 約束の記録を報告する成員の ID

結果 … 約束が履行されたか反故にされたかの結果 (「成功」もしくは「失敗」とする)

8.1.2 社会指標

社会指標とは、なんだ！！？

社会指標の決定アルゴリズム

評判システムを式に！！

8.1.3 成員の振る舞い

前の章のをいい感じに！！

8.2 本論の課題

実際の社会を想定した場合、成員の人数が増えることが考えられる。本論で示したモデルでは定数の場合しか示していない。また、強制執行力が存在する場合、検証 2 をヒューリスティックなカタチでして検証できない。もっと $3k+1$ なら安全！！的なことを言える証明をつけるか、すごいパソコン使って全通り試したぜ！！的なことが言いたい、、

8.3 今後の研究

たぶん検証 2 はエージェントの種類の構成次第の複雑系なんで、解明できる自身がない。すごいパソコンで全通り探索したい。検証 2 の結果だと $3f+1$ くらいの場合は確実に約束が遵守されそうだし、署名なしのビザンチン将軍問題の解でも 6 人以上の場合は同じ結果になりそう。検証 3 は PBFT とかのアルゴリズムにもできるかもしれない。 f の評判スコアを落として排除することができるので、時刻 t に置いて $3f+1$ が守られてれば時刻 $t+1$ で f が増えても耐えられるアルゴリズムが組めるかもしれない。あと、今回、集団の人数が一定の場合しかやってないからやってないから人数が変化する場合も考えたい。たぶん新規参加者の評判スコアをどうするかが論点になる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、2016 年度秋学期から所属していた研究軍団 NECO 及び RG(村井・徳田・中村・楠本・高汐・バンミーター・植原・三次・中澤・手塚・武田合同研究会)の皆様、慶應 SFC の教員の皆様、大学進学を支援してくださった家族に感謝しております。

中でも、研究軍団 NECO にて、参加当初からお世話になっていた早稲田大学 大学院経営管理研究科 教授 齊藤賢爾氏に感謝いたします。本研究が全く問題意識をはっきりとしない頃から議論に付き合っていたことは勿論のこと、齊藤氏が著書「信用の新世紀 ブロックチェーン後の未来」の中で描かれている社会の未来像が、この研究の大きなモチベーションになっております。彼のデジタルマネーに関する思想に出会わなければ、本研究における問題意識を抱くこともなく、社会契約を研究対象として選ぶこともなかったでしょう。

代々 KGL として NECO の運営を担ってくださった阿部涼介氏、菅藤 佑太氏、島津 翔太氏、渡邊 聡紀氏にも感謝いたします。特に慶應義塾大学 政策・メディア研究科 博士課程の阿部涼介氏は自分にも他人にも厳しい方でしたが、彼の研究への姿勢から多くを学ぶことができました。

日頃より、RG の運営や講義、研究発表でお世話になっている慶應義塾大学教授 村井純博士、同学部教授 中村修博士、同学部教授 楠本博之博士、同学部教授 高汐一紀博士、同学部教授 Rodney D. Van Meter III 博士、同学部准教授 植原啓介博士、同学部教授 三次仁博士、同学部教授 中澤仁博士、同学部教授 武田圭史博士、同大学政策・メディア研究 科特任准教授 佐藤雅明博士、同大学政策・メディア研究科特任教授 鈴木茂哉博士に感謝いたします。そうした運営に携わってくださった RG Coordinator の方々もありがとうございます。

最後に、慶應 SFC という素敵なキャンパスでの大学生活を支えてくださった教員の皆さまや友人、家族に感謝しております。

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 (シエル) 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*. 1755.
- [9] Brian Skyrms. The stag hunt. In *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association*, volume 75, pages 31–41. JSTOR, 2001.
- [10] Ullmann-Margalit Edna. The emergence of norms, 1977.
- [11] John Mackie. *Ethics*. Penguin Books Ltd, 1977.
- [12] John C Harsanyi. Cardinal welfare, individualistic ethics, and interpersonal comparisons of utility. *Journal of Political Economy*, 63(4):309–321, 1955.
- [13] John Rawls. *A Theory of Justice*. Cambridge: Harvard University Press, 1971.
- [14] Robert Sugden. *The Economics of Rights, Co-operation and Welfare*. Oxford: Basil Blackwell, 1986.
- [15] Ken Binmore. *Playing Fair (Game Theory and the Social Contract; vol 1)*. Cambridge: The MIT Press, 1994.
- [16] Ken Binmore. *Just Playing (Game Theory and the Social Contract, vol. 2)*. Cambridge: The MIT Press, 1998.
- [17] Brian Skyrms. *Evolution of the social contract*. Cambridge University Press, 1996.
- [18] Herbert A Simon. *Administrative behavior; a study of decision-making processes in administrative organization*. 1947.
- [19] Gregory Wheeler. Bounded Rationality. In Edward N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, Fall 2020 edition, 2020.

- [20] Werner Güth, Rolf Schmittberger, and Bernd Schwarze. An experimental analysis of ultimatum bargaining. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 3(4):367–388, 1982.
- [21] LESLIE LAMPORT, ROBERT SHOSTAK, and MARSHALL PEASE. The byzantine generals problem. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 4(3):382–401, 1982.