

# ROSCA 型相互扶助ゲームにおける 協力進化を促すメカニズムの提案

矢澤 直人<sup>1,a)</sup> 秋山 英三<sup>2,b)</sup>

受付日 2019年1月25日, 採録日 2019年7月3日

**概要:** 社会集団におけるジレンマ状況は, しばしば「公共財ゲーム」を用いて分析される. 公共財ゲームでは財が分割されてメンバ全員に等しく配られることが想定されるが, 現実では必ずしもそうとは限らない. 財が分割されずに集団内のメンバに対して交互に配られるということもある. こうした状況を表現したモデルとして, 「ROSCA 型相互扶助ゲーム」がある. 過去の研究において, ROSCA 型相互扶助ゲームでは, 「選別ルール」と「受領権喪失ルール」という 2つのルールがある程度協力進化を促すということが示されている. しかし, これら 2つのルールでも完全に非協力を抑制できていない. 本研究では, 協力確率をさらに高めるためのルールとして新しく「次回参加拒否ルール」を提案する. そして, 進化シミュレーションを用いることで ROSCA 型相互扶助ゲームにおけるルールの有効性の検証を行う. 分析の結果, 次のことが分かった. 1) 次回参加拒否ルールは, 未来利益が大きいと協力確率を大きく向上させる. 2) 既存の 2つのルールと次回参加拒否ルールをすべて組み合わせると, 最も協力確率が高くなる. また, ここから選別ルールを除いた 2つのルールの組み合わせでも, 同程度の協力確率を導くことができる. このことは, 受領権喪失ルールと次回参加拒否ルールの組み合わせが, 現実の ROSCA 型相互扶助ゲームへの提案として最も適していることを示している.

キーワード: ROSCA, 協力, 進化, メカニズム, 罰則

## A Mechanism to Facilitate the Evolution of Cooperation in ROSCA-type Mutual-aid Games

NAOTO YAZAWA<sup>1,a)</sup> EIZO AKIYAMA<sup>2,b)</sup>

Received: January 25, 2019, Accepted: July 3, 2019

**Abstract:** In a public goods game, it is assumed that goods are divided into players, but it is not always true in reality. The “ROSCA-type mutual-aid game” is a model which describes a case where goods are not divided. According to a previous research, cooperation evolves to some extent in this game if both the “peer selection rule” and the “forfeiture rule” exist. However, these two rules can not perfectly suppress non-cooperative behaviors. In this study, we propose a new rule the “denial of the next participation rule”, which is expected to further suppress non-cooperative behaviors. We examine the effectiveness of rules by means of evolutionary simulations. As a result, we have found the following results. (i) The denial of the next participation rule can greatly improve the frequency of cooperation when the future benefit is high. (ii) The combination which promotes cooperation most is a set of all the three rules. In addition, the combination which promotes it to the same extent is a set of the two rules except the peer selection rule. We recommend the set of these two rules as the best combination to be applied to real ROSCA-type mutual-aid games.

**Keywords:** ROSCA, cooperation, evolution, cooperation, mechanism, punishment

<sup>1</sup> 筑波大学大学院システム情報工学研究科  
Graduate School of Systems and Information Engineering,  
University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305–8573, Japan

<sup>2</sup> 筑波大学システム情報系工学域  
Faculty of Engineering, Information and Systems, University  
of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305–8573, Japan

<sup>a)</sup> s1820502@st.tsukuba.ac.jp

<sup>b)</sup> eizo@sk.tsukuba.ac.jp

## 1. はじめに

### 1.1 背景

私たちが暮らす社会では、人々が助け合い協力し合うことで互いに利益を享受するような場面が多く見られる。こうした協力的行動は、家族間といった血縁のある者同士だけではなく、血縁のない者同士で発生することも少なくない。しかし、他者への協力の際には自身に対して一定のコストがかかるため、社会の中では協力をしないで自分だけが得をしようとする者も存在する。この問題は、一種の社会的ジレンマとしてとらえることができる。社会的ジレンマとは、社会全体に対して最適な選択と、自身にとって最も合理的な選択が一致せず対立し合っている状況のことを表す。

これまで、集団における社会的ジレンマに関する研究は、主に「公共財ゲーム」を用いて行われてきた。一般的な公共財ゲームのモデルでは、プレイヤー全体から集められた金額が一定数 ( $> 1$ ) 倍され、それが各プレイヤーに均等に分配される。全員がすべてのお金を支払うことで社会的な効用は最大化されるが、一方であるプレイヤーが他のプレイヤーより支払う金額が少なかった場合、支払う金額が少なかったプレイヤーは他のプレイヤーよりも多くの利益を得る。このように、最大限の貢献をしないで自分だけが利益を得ようとするプレイヤーをフリーライダーと呼ぶ。フリーライダーの発生は社会的効用を低下させるため、どのようにしてこれを抑制するのかということが公共財ゲームにおいて非常に重要な問題となる。これを解決する方法としては、社会的な評判による間接互惠性 [1], [2] や、社会の空間的構造 [3], [4], 非協力者への罰則 [5] などがあげられている。

ところで、社会に存在する財は公共財ゲームの場合のように必ずしも分割されるわけではない。財が分割されずに集団内のメンバーに対して交互に配られることがある。たとえば、農家 A、農家 B、農家 C があるとすると、各農家の農繁期はそれぞれ異なり、農家 A が忙しい春は農家 B と農家 C がその農作業を手伝う。この場合、各農家の労働が財にあたり、これは分割されると意味をなさない。そして、夏に忙しい農家 B を農家 A と農家 C が手伝い、秋に忙しい農家 C を農家 A と農家 B が手伝う。このシステムによって、各農家は単独では得ることのできなかった利益を享受するのである。このように、財が分割されずに交互に配られるような構造は、金銭の取引でも見られる。金銭自体は分割財であるといえるが、ビジネスを行ったり大きな買い物をしたりするのが目的の際には少額では役に立たない。そこで、まとまった額のお金を必要とする人々が集まって取引が行われる。こうした取引が行われる代表的な例に、“ROSCA (rotating savings and credit association)” と呼ばれる金融組織がある。

ROSCA とは、一般に友人や隣人のグループによって形成

される非公式的な民間の金融組織のことである。ROSCA は世界各地でその存在が確認されており [6], [7], 日本語では「回転型貯蓄信用講」と訳される [8]。櫻井 [9] によると、日本における ROSCA は、東日本では頼母子講 (たのもしこう) や無尽 (むじん) と呼ばれ、九州や沖縄を中心とした西日本では模合 (もあい) と呼ばれているという。ここで、最もシンプルな ROSCA の流れを説明する。参加者の人数が  $n$  人の場合、 $n$  回の「会合」が定期的に行われる。1 回の会合で参加者全員が金銭的な出資を行い、その後、くじや入札によって決定した参加者 1 名が、集められた資金からなるファンドを受領する。このとき、すでに受領を済ませている参加者が再びファンドを受領することはない。よって、最終的に  $n$  回の会合中で参加者が 1 人 1 回ずつファンドを受領することになる。ROSCA では、参加者が 1 度にまとまった額の資金を得ることができるが、一方で参加者の資金の不払いが起こりうる。辻本ら [10] によると、公共財ゲームの場合と同様に、ROSCA でも資金の不払い、すなわちフリーライダーが発生することが観察されている。資金の不払いが発生すると、受領を行う参加者が被害を受けることになるため、これを防がない限り ROSCA は成立しない。したがって、ROSCA においても、どのようにしてフリーライダーを抑制し、協力的行動を促進させるのかということが非常に重要な問題になってくる。

### 1.2 先行研究：Koike ら [11] によるシミュレーション研究

Sugden [12] は、集められた財が分割されずに集団内のメンバー 1 人に配られるようなシステムを表現したモデルとして、「相互扶助ゲーム」を提案している。また、Koike ら [11] は、相互扶助ゲームの中でも、ROSCA のように集められた財が各メンバーに対して 1 人 1 回ずつ配られるような場合のみ限定したモデルを使用している。本研究では、Koike ら [11] が使用したこのモデルを、「ROSCA 型相互扶助ゲーム」と呼ぶことにする。

Koike ら [11] は、ROSCA 型相互扶助ゲームは ROSCA だけでなく社会や経済における様々な場面に適用できると議論している。そして彼らは ROSCA 型相互扶助ゲームにおける協力的行動の進化のメカニズムについて、進化シミュレーションによる検証を行っている。彼らの検証によると、ROSCA 型相互扶助ゲームでフリーライダーを抑制し、協力的行動を促進するためには 2 つのルールが必要であるという。1 つ目のルールは、参加者の「選別ルール」である。選別ルールでは、各プレイヤーに評判レベルが与えられており、プレイヤー全員の初期評判レベルは 0 である。ゲームが始まると、各プレイヤーの評判レベルは、協力的行動をとった場合に +1、裏切り行動をとった場合に -1 の変動が起こる。そして新しいグループを組む際に、この評判レベルを用いてプレイヤーの参加の選別が行われる。2 つ目のルール

は、「受領権喪失ルール」である。受領権喪失ルールでは、財の受け取り前に裏切りを働いたプレイヤーが、そのゲームで財を受け取ることができなくなる。このルールによって、財の受け取り前の裏切りが抑制される。Koikeら [11] では、これら2つのルールはそれぞれ単独だとフリーライダーを抑制するのは難しいが、同時に存在することで協力行動が強く促進されることが述べられている。

ところが、Koikeら [11] では選別ルールと受領権喪失ルールが同時に存在する場合に、プレイヤーが財を受け取る前の行動による評判レベルの変動を考慮していない。すなわち、財の受け取り前の行動によって周囲に与えられる印象を無視している。これは、受領権喪失ルールが存在するとほぼすべてのプレイヤーが協力行動をとるために、受け取り前の行動からは何の情報も得られないとしているからである。しかし、現実の ROSCA 型相互扶助ゲームにおいては、たとえ受領権喪失ルールが存在していても財の受け取り前に裏切り行動が発生することはありうるだろう。よって、財の受け取り前にプレイヤーが協力や裏切りをした際に評判レベルの変動が起こらないとは考えにくい。たとえば、ROSCA が行われている中でまだファンドの受け取りを終えていない参加者が会合に欠席することなく誠実に資金を払い続けていたのなら、周囲からの評判は良くなるであろう。よって、選別ルールと受領権喪失ルールが同時に存在する場合でも、財の受け取り前の行動による評判レベルの変動は考慮すべきである。

また、Koikeら [11] の検証では、選別ルールと受領権喪失ルールが同時に存在している場合でも ROSCA 型相互扶助ゲームにおけるフリーライダーを完全には抑制できていない。特に、財の受け取り後に裏切りを働くようなプレイヤーが発生してしまっている。よって、財の受け取り後の裏切りを抑制することができるようなルールを新たに考える必要がある。

### 1.3 研究目的

これらの点をふまえ、本研究では進化シミュレーションを行うことにより ROSCA 型相互扶助ゲームにおける次の3つの検証を行う。1つ目は、選別ルールと受領権喪失ルールが同時に存在する場合、財の受け取り前の行動による評判レベルの変動を考慮すると、協力行動は進化するかどうかを明らかにすることである。2つ目は、「次回参加拒否ルール」を新たに提案し、選別ルールや受領権喪失ルールに加えることで、どのような効果が得られるのかを分析することである。ここで、次回参加拒否ルールとは、財の受け取り後に裏切りを働いたプレイヤーが、次のゲームでグループに参加することができなくなるというルールである。このルールによって、Koikeら [11] では抑制されていない財の受け取り後の裏切りが排除されることが期待できる。そして3つ目は、現実の ROSCA 型相互扶助ゲーム

への提案として、最も適したルールの組合せはどのようなものなのかを探索することである。

## 2. モデル

この章では、本研究で使用したモデルについての説明を行う。本研究のモデルは Koikeら [11] のモデルを基にしているが、評判レベルの変動の設定については変更を加えた。また、次回参加拒否ルールは本研究で新しく導入したものである。

### 2.1 ベースラインモデル

この節では、最も基本となるモデル（ベースラインモデル）についての説明を行う。

まず、1試行の流れを説明する。1試行は  $g$  世代から成り立つ。さらに1世代は  $r$  回の循環から成り立つ。1循環の初め、 $N$  人のプレイヤーが  $m$  個のグループにランダムかつ均等に分けられる。よって、各グループはそれぞれ  $N/m$  人のメンバで構成される。グループの人数が  $n (= N/m)$  人の場合、1循環の間に  $n$  回の会合が開かれる。各会合で各プレイヤーは協力するか裏切るかを決める。もし協力するならば  $x$  のコストを支払い、裏切るなら支払わなくていい。ただし、各プレイヤーには1世代の初めに初期利得  $x(N/m)r$  が与えられているものとする。そして、協力者たちが支払うコストによって生産される財を、グループ内のプレイヤー1人が受け取る。 $n$  回の会合を通してグループ内のすべてのプレイヤーが1回ずつ受け取りを行う。また、グループ内の受け取りの順番はランダムに決まる。1循環が終わるとグループは解散し、次の循環が開始される。 $r$  回の循環が終了すると、1世代が終了する。1世代が終了すると、各プレイヤーが戦略の更新を行い、次の世代が始まる。これを  $g$  世代まで繰り返すと、1試行の終了である。

次に、プレイヤーのとりうる戦略の説明を行う。各プレイヤーはそれぞれ  $q_1, q_2$  という戦略（遺伝的形質）を持つ。 $q_1$  は財の受け取り前の協力確率、 $q_2$  は財の受け取り後の協力確率を意味する。このモデルでは、簡略化のために  $q_1, q_2 = 1$  or  $0$  と仮定している。すると、 $q_1$  と  $q_2$  の組合せは全部で  $2 \times 2 = 4$  通りである。ここで、 $q_1$  と  $q_2$  の組合せを出資戦略と呼ぶ。プレイヤーのとりうる出資戦略のタイプは表1のようになる。

協力戦略ではつねに協力が選択され、裏切り戦略ではつ

表1 出資戦略のタイプ

Table 1 Types of investment strategies.

	$q_1$	$q_2$
協力戦略	1	1
デフォルト戦略	1	0
逆デフォルト戦略	0	1
裏切り戦略	0	0

ねに裏切りが選択される．デフォルト戦略では財の受け取り前のみ協力が選択され，逆デフォルト戦略では財の受け取り後のみ協力が選択される．フリーライドにあたるのは，協力戦略を除いたデフォルト戦略，逆デフォルト戦略，裏切り戦略の3つの戦略である．第1世代の初めに各プレイヤーに4つの戦略がランダムに与えられる．第2世代以降に行われる戦略更新については，後ほど詳しく説明する．

次に，1循環でのプレイヤーの利得式 (1) を示す． $u$  回目 ( $1 \leq u \leq r$ ) の循環中の  $t$  回目 ( $1 \leq t \leq n$ ) の会合で財を受け取るプレイヤーの利得  $I_{u,t}$  は，次のようになる．

$$I_{u,t} = \left( \sum_{j=1}^{t-1} q_{2j} + \sum_{j=t+1}^n q_{1j} \right) xw^{n+1-t} - [(t-1)q_{1t} + (n-t)q_{2t}]x \quad (1)$$

1循環の中で早く財を受け取れるプレイヤーほど，早期に自分の事業へ投資を行えるため実質的な便益は大きい．そこで，利得式 (1) では未来利益  $w$  ( $\geq 1$ ) を定義する． $w = 1$  だと未来利益は意味を持たない．一方で， $w$  が大きくなるほどプレイヤーが早く財を受け取るメリットも大きくなる．また， $q_{1t}$  と  $q_{2t}$  は  $t$  回目の会合で財を受け取るプレイヤーの  $q_1$  と  $q_2$  を意味する．右辺の第1項は未来利益を反映した財の受け取り分を表しており，第2項は1回の循環を通じて他のプレイヤーに協力する際にかかったコストの合計を表す．たとえば，1回の循環中グループ内すべてのプレイヤーがつねに協力をした場合， $t$  回目の会合で財を受け取るプレイヤーの利得は  $(n-1)xw^{n+1-t} - (n-1)x$  になる．逆に，グループ内すべてのプレイヤーがつねに裏切った場合，プレイヤーの利得は0になる．各プレイヤーは1世代が終了するまで初期利得  $x(N/m)r$  にそれぞれの循環での利得を加算していく．

最後に，各世代が終わってから次の世代が始まる際の戦略更新の仕組みを説明する．まず，世代終了時に同じ戦略を持つプレイヤー同士で利得を合計し，これを戦略の合計獲得利得とする．さらに，突然変異の発生確率を  $\mu$  とする．各プレイヤーの戦略は，次の世代の初めに  $1 - \mu$  の確率ですべての戦略の合計獲得利得の比率に応じて決定 (ルーレット選択) され，残りの  $\mu$  の確率ですべての戦略の中から1つランダムに決定 (突然変異) する．

## 2.2 ルールを含むモデル

この節では，選別ルール，受領権喪失ルール，次回参加拒否ルールが存在する場合に，2.1節のベースラインモデルがどのように変更されるのかをルールごとに説明する．

### 2.2.1 選別ルール

選別ルールが存在するとき，プレイヤーの持つ戦略 (遺伝的形質) に評判の閾値  $k$  ( $-6 \leq k \leq 6, k \in \mathbb{Z}$ ) が加わる． $k$  のとりうる値は全部で13通りなので， $q_1, q_2, k$  の組合せは全部で  $2 \times 2 \times 13 = 52$  通りになる．戦略更新では，

ベースラインモデルと同様に  $1 - \mu$  の確率でルーレット選択が行われ，残りの  $\mu$  の確率で突然変異が起こる．

また，各プレイヤーは評判レベル  $s$  ( $-5 \leq s \leq 5, s \in \mathbb{Z}$ ) をそれぞれ持つ．これは戦略 (遺伝的形質) ではないパラメータである． $s$  は世代の初めに0にリセットされ， $q_1, q_2$  の値によって各循環の終わりに以下のように変動する．

各循環の終わりで評判レベル  $s$  の変動の仕方  
 $[q_1 = 1$  ならば1上昇,  $q_1 = 0$  ならば1減少]  
 かつ  $[q_2 = 1$  ならば1上昇,  $q_2 = 0$  ならば1減少]

(※ Koike ら [11] では，選別ルールと受領権喪失ルールが同時に存在する場合， $q_1$  による  $s$  の変動を考慮しない)．

よって，各循環の終わりで各出資戦略の評判レベル  $s$  の変動は表 2 のようになる．

各循環の終わりに，協力戦略なら +2，デフォルト戦略と逆デフォルト戦略なら  $\pm 0$ ，裏切り戦略なら -2 だけ  $s$  が変動する．

ここからは，評判の閾値  $k$  と評判レベル  $s$  を用いて，どのように参加者の選別が行われるのかを説明する．各循環の初めに，プレイヤーはランダムかつ均等にグループに分けられ，そのグループの参加候補者になる．参加者の選別はグループごとに行われる． $n$  人のグループ  $i$  の参加候補者  $j$  の評判の閾値を  $k_{i,j}$ ，評判レベルを  $s_{i,j}$  とすると，このプレイヤーの参加が成立するためには，次の2つの条件式 (2) と (3) を満たす必要がある．

- i). 次の条件式 (2) は，グループ  $i$  の参加候補者  $j$  の評判レベル  $s_{i,j}$  が，そのグループのすべての参加候補者の評判の閾値  $k$  の平均以上であることを意味する．つまり，この条件式を満たせば，参加候補者  $j$  がグループ  $i$  から認められたことになる．

$$s_{i,j} \geq \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{i,j} \quad (2)$$

- ii). 次の条件式 (3) は，グループ  $i$  の参加候補者  $j$  の評判の閾値  $k_{i,j}$  が，そのグループのすべての参加候補者の評判レベル  $s$  の平均よりも小さいことを意味する．つまり，この条件式を満たせば，参加候補者  $j$  がグループ  $i$  を認めたことになる．

$$k_{i,j} \leq \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_{i,j} \quad (3)$$

表 2 各循環の終わりにおける  $s$  の値の変動

Table 2 Changes of the value of  $s$  at the end of each rotation.

出資戦略	$s$ の変動
協力戦略	+2
デフォルト戦略	$\pm 0$
逆デフォルト戦略	$\pm 0$
裏切り戦略	-2

この2つの条件式(2)と(3)がともに満たされれば、グループ*i*の参加候補者*j*が循環中にグループに参加することになる。逆にどちらか一方でも満たされなければ、不参加になる。このように、参加者の選別には評判の閾値*k*と評判レベル*s*のみが使用され、プレイヤーがそのとき持っている出資戦略*q*<sub>1</sub>と*q*<sub>2</sub>はいっさい関係しない。グループに参加した場合、ベースラインモデルと同様にゲームを行い、利得式(1)によって計算される利得を所持利得に加算する。ただし、選別ルールによってグループの人数が*n* ≠ *N*/*m*人になる可能性があるため、利得計算の際には注意が必要である。グループに参加しなかった場合、その循環中に利得が加算されることはなく、評判レベルも変動しない。

2.2.2 受領権喪失ルール

受領権喪失ルールが存在するとき、財の受け取り前に裏切りを働いたプレイヤーは、その循環中に財を受け取ることができなくなる。つまり、*q*<sub>1</sub> = 0 (逆デフォルト戦略と裏切り戦略)のプレイヤーは、利得式(1)の右辺の第1項が0になる。そのほかの設定はベースラインモデルと変わらない。

2.2.3 次回参加拒否ルール

次回参加拒否ルールが存在するとき、財の受け取り後に裏切りを働いたプレイヤーは、次の循環でグループに参加することができなくなる。つまり、*q*<sub>2</sub> = 0 (デフォルト戦略と裏切り戦略)のプレイヤーは、次の循環中に利得が加算されることはない。ただし、次回参加拒否ルールによってグループの人数が*n* ≠ *N*/*m*人になる可能性があるため、グループに参加しているプレイヤーの利得計算の際には注意が必要である。また、次回参加拒否ルールと選別ルールが同時に存在するとき、グループへの参加が拒否された場合、その循環中に評判の変動は起こらない。さらに、参加者の選別の際、次回参加拒否ルールによって参加を拒否されたプレイヤーは除いて評判の閾値、評判レベルのグループ平均の計算を行う。この際にも、1グループあたりの参加候補者の人数が*N*/*m*人にならない可能性があることに注意しなくてはならない。

2.3 パラメーターの設定

この節では、各種パラメータの設定について記載する。それぞれのパラメータを以下のように設定した。

- 世代数：*g* = 10,000
- 循環の数：*r* = 20
- プレイヤ数：*N* = 100
- グループの数：*m* = 5
- 協力する場合の出資額：*x* = 1
- 未来利益：*w*
  - 様々な未来利益*w*における協力確率の値を見るため、 $1.0 \leq w \leq 1.5$ の範囲を0.01刻みで変化させた。

- 突然変異の発生確率： $\mu = 0.005$

次章では、実際のシミュレーションによって導き出された結果を示す。1試行(10,000世代)におけるすべてのプレイヤーの*q*<sub>1</sub>、*q*<sub>2</sub>の平均を計算し、さらにその50試行の平均の算出を行って結果を示す。

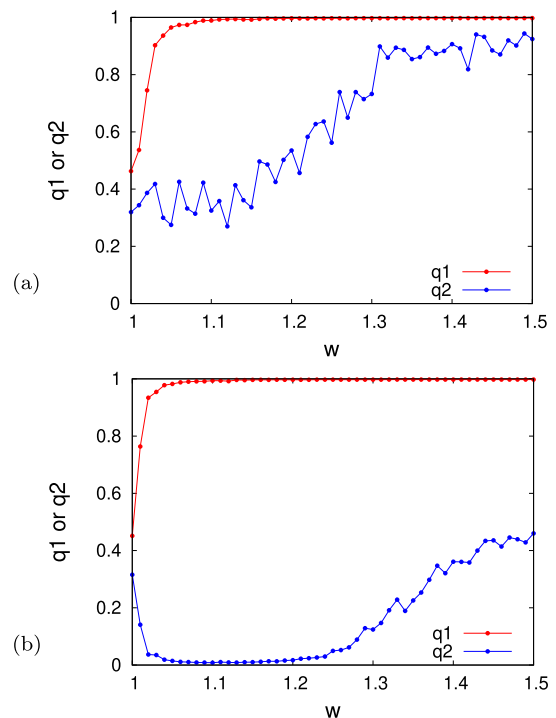
3. 結果と分析

3.1 財の受け取り前の行動による評判レベルの変動を考慮することによる影響

選別ルールと受領権喪失ルールが同時に存在する場合、財の受け取り前の協力確率*q*<sub>1</sub>による評判レベル*s*の変動を考慮しないときと考慮したときそれぞれについて、未来利益*w*とプレイヤーの平均協力確率*q*<sub>1</sub>、*q*<sub>2</sub>との関係は図1のようになった。

図1(a)は、財の受け取り前の協力確率*q*<sub>1</sub>による評判レベル*s*の変動を考慮しない場合のプレイヤーの平均協力確率を示している。ここでは、未来利益*w*が1付近でないときに*q*<sub>1</sub>が強く進化した。一方で、*q*<sub>2</sub>も*w*がある程度大きいと高い値になった。これはKoikeら[11]の検証の再現であるといえる。

図1(b)は、財の受け取り前の協力確率*q*<sub>1</sub>による評判レベル*s*の変動を考慮する場合のプレイヤーの平均協力確率を示している。現実のROSCA型相互扶助ゲームでは、たとえ受領権喪失ルールが存在していても財の受け取り前の参



(a) *q*<sub>1</sub>による*s*の変動を考慮しないとき (Koikeら[11]と同設定)  
 (b) *q*<sub>1</sub>による*s*の変動を考慮するとき (より現実に近い設定)

図1 *w*と*q*<sub>1</sub>、*q*<sub>2</sub>の関係(選別ルールあり、受領権喪失ルールあり)  
 Fig. 1 Relationship between *w* and *q*<sub>1</sub>, *q*<sub>2</sub>: when both the peer selection rule and the forfeiture rule are assumed.

加者の行動によって評判レベルは変動すると考えられるため、これはより現実に近い設定であるといえる。各図 (a) と比較すると  $w$  がより小さくても  $q_1$  は強く進化したが、 $q_2$  は  $w$  の値に関係なくあまり進化しなかった。

2つの結果において  $q_2$  の進化に差異が生じたのは、財の受け取り前の協力確率  $q_1$  による評判レベル  $s$  の変動を考慮すると、考慮しないと比べてプレイヤーの  $s$  の値が相対的に高くなり、財の受け取り後に協力を選択しなくてもある程度  $s$  の値を高く維持できるからであると考えられる。

これらの結果から、財の受け取り前の協力確率  $q_1$  による評判レベル  $s$  の変動を考慮するように設定することは、プレイヤーの平均協力確率  $q_1, q_2$  に大きな影響を及ぼすことが分かった。つまり、ROSCA 型相互扶助ゲームにおける協力的行動の進化を考えるうえで、財の受け取り前の評判レベルの変動の有無を軽視することはできないということが判明した。また、受領権喪失ルールによって、図 1(a) と図 1(b) では  $w$  の値が 1 付近でないときに  $q_1$  が 1 に限りなく近い値になっている。これはほぼすべてのプレイヤーが財の受け取り前に協力をしていることを意味するが、現実の ROSCA 型相互扶助ゲームではそのような状況下でも評判レベルが動かないとは考えにくい。それをふまえると、選別ルールと受領権喪失ルールが存在する場合に、 $q_1$  による  $s$  の変動を考慮することは非常に重要であるといえる。

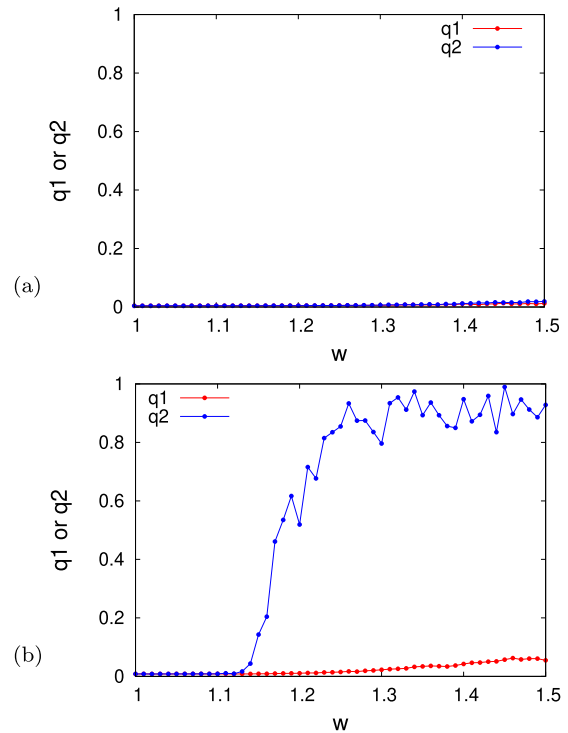
次節以降は、選別ルールが存在する場合に、 $q_1$  による  $s$  の変動、 $q_2$  による  $s$  の変動がつねに考慮される設定によって行われたシミュレーションの結果を示す。

### 3.2 次回参加拒否ルールの有無による平均協力確率の変化

新たに提案した次回参加拒否ルールの有無によって、プレイヤーの平均協力確率  $q_1, q_2$  にどのような変化が見られるのかを表したのが、図 2、図 3、図 4、図 5 である。これらの図は、ルールの組合せごとの未来利益  $w$  と受け取り前後の平均協力確率  $q_1, q_2$  の関係を示している。

まず、図 2 に注目する。図 2(a) はルールが何も存在しない場合における平均協力確率  $q_1$  と  $q_2$  の結果であり、協力はまったく進化していないことが分かる。ここでは  $w$  の値に関係なく  $q_1$  も  $q_2$  もほぼ 0 となっており、裏切り戦略が蔓延している。ここに次回参加拒否ルールを加えると、図 2(b) のように  $w$  がある程度大きい範囲で  $q_2$  が高い値をとった。一方で、 $q_1$  は  $w$  が大きいと若干上昇したが、全体的にはほとんど進化しなかった。このとき、 $w$  が大きいと逆デフォルト戦略が進化したといえる。

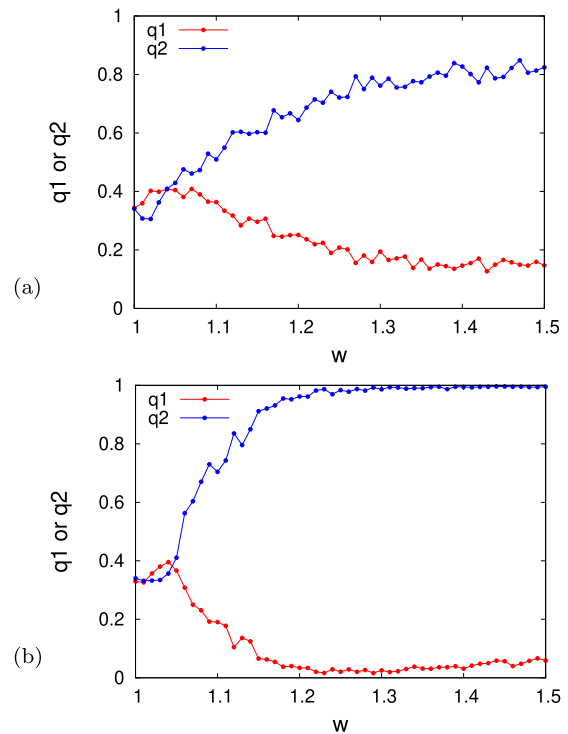
次に、図 3 に注目する。図 3(a) を見ると、選別ルールのみがある場合に  $w$  が小さいと  $q_1$  も  $q_2$  も 0.4 付近となり、 $w$  が大きいと  $q_1$  は小さい値をとって  $q_2$  は大きい値をとった。ここに次回参加拒否ルールを加えると、図 3(b) のように  $w$  が小さいとあまり変化は見られなかったが、 $w$  が大



次回参加拒否ルール (a) 導入前 (b) 導入後

図 2  $w$  と  $q_1, q_2$  の関係 (選別ルールなし, 受領権喪失ルールなし)

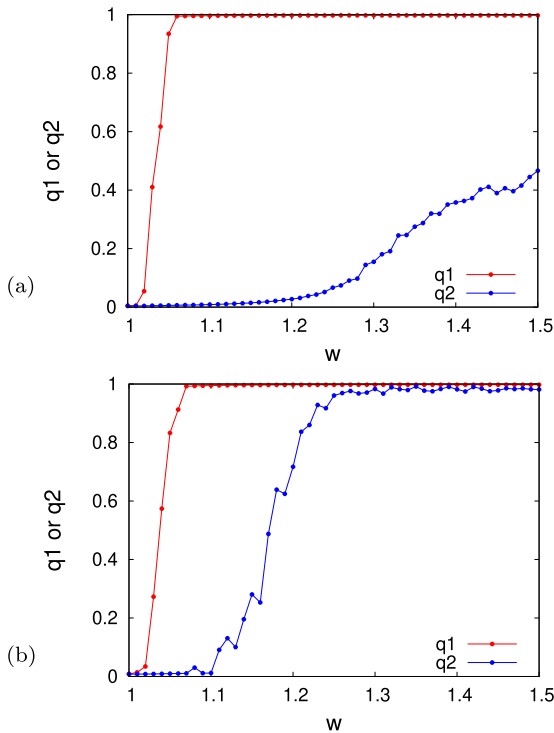
Fig. 2 Relationship between  $w$  and  $q_1, q_2$ : when neither the peer selection rule nor the forfeiture rule is assumed.



次回参加拒否ルール (a) 導入前 (b) 導入後

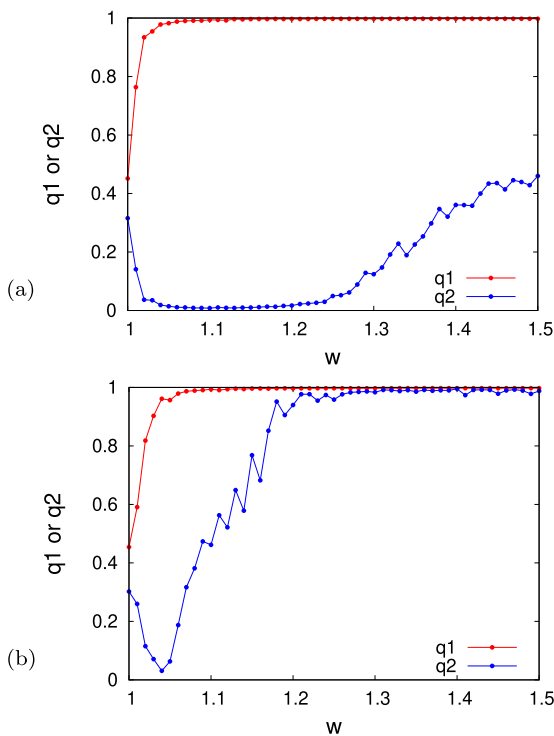
図 3  $w$  と  $q_1, q_2$  の関係 (選別ルールあり, 受領権喪失ルールなし)

Fig. 3 Relationship between  $w$  and  $q_1, q_2$ : when not the forfeiture rule, but the peer selection rule is assumed.



次回参加拒否ルール (a) 導入前 (b) 導入後

図 4  $w$  と  $q_1, q_2$  の関係 (選別ルールなし, 受領権喪失ルールあり)  
**Fig. 4** Relationship between  $w$  and  $q_1, q_2$ : when not the peer selection rule, but the forfeiture rule is assumed.



次回参加拒否ルール (a) 導入前 (b) 導入後

図 5  $w$  と  $q_1, q_2$  の関係 (選別ルールあり, 受領権喪失ルールあり)  
**Fig. 5** Relationship between  $w$  and  $q_1, q_2$ : when both the peer selection rule and the forfeiture rule are assumed.

きいと  $q_1$  がさらに低い値をとり  $q_2$  がさらに高い値をとるようになった。このとき、 $w$  が大きいと逆デフォルト戦略が進化したといえる。

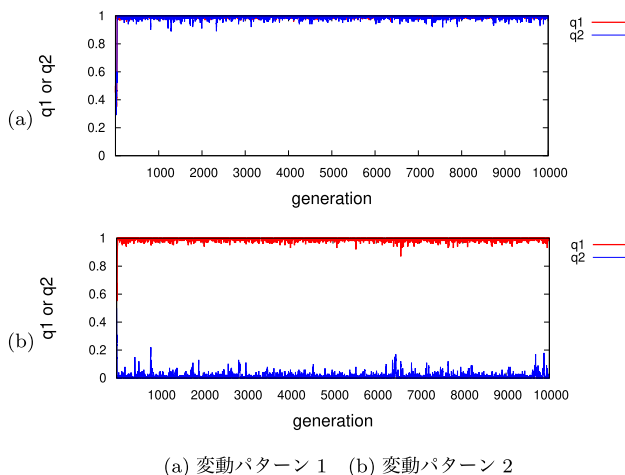
続いて、図 4 に注目する。図 4(a) を見ると、受領権喪失ルールのみがある場合に  $w$  が 1 付近でないとき  $q_1$  が強く進化した。また、 $w$  が大きいとき  $q_2$  も少しだけ高い値をとった。ここに次回参加拒否ルールを加えると、図 4(b) のように  $q_1$  はあまり変化せず、 $w$  が大きいとき  $q_2$  が強く進化するようになった。このとき、 $w$  が大きいとき協力戦略が進化したといえる。

最後に、図 5 に注目する。図 5(a) は図 4(b) とまったく同じものである。これを見ると、選別ルールと受領権喪失ルールがある場合の  $q_1, q_2$  は、受領権喪失ルールのみがある場合、すなわち図 4(a) の  $q_1, q_2$  とほぼ同じ値になった。ここに次回参加拒否ルールを加えると、図 5(b) のように  $q_1$  はあまり変化せず、 $w$  が大きいとき  $q_2$  が強く進化するようになった。さらに、図 5(b) と図 4(b) の結果もよく似ているが、 $w$  が小さいとき図 5(b) の方が少しだけ  $q_1, q_2$  が高い値になっていることが分かる。また、このときも  $w$  が大きいとき協力戦略が進化したといえる。

これらの結果から、新たに提案した次回参加拒否ルールは、 $w$  がある一定の値よりも大きければ財の受け取り後の協力確率  $q_2$  を高めることができるということが分かった。このことは、次回参加拒否ルールが罰則として機能したととらえることもできる。また、次回参加拒否ルールと受領権喪失ルールがともに存在する場合、 $w$  が大きいとき協力戦略のみが進化するということも明らかになった。

ここで、これまで全世代 50 試行の平均  $q_1, q_2$  を見ながら議論を行ってきたが、1 試行の中で  $q_1$  や  $q_2$  がどのように推移するのかについても考えてみたい。特に、本研究で初めて検証を行っている次回参加拒否ルールが存在するようなルールの組合せにおける  $q_1$  や  $q_2$  の推移については、十分に分析を行う必要がある。そこで、3 つのルールがすべて存在する場合に、1 試行の中で  $q_1$  と  $q_2$  の平均が世代ごとにどのような値をとっているのかを観察した。 $w = 1.1$  に固定して 30 試行の計算を実行してみたところ、 $q_1, q_2$  の平均の推移は図 6(a), (b) のような 2 パターンしか確認されなかった。

図 6(a) では、初期世代で  $q_1$  も  $q_2$  も 1 付近に収束している。そして図 6(b) では、初期世代で  $q_1$  が 1 付近に、 $q_2$  が 0 付近に収束している。今回計算をした 30 試行では、 $q_1, q_2$  の平均が必ずこの 2 パターンのどちらかの動きを見せた。このとき、図 5(b) では  $w = 1.1$  のときに  $q_1$  がおよそ 1、 $q_2$  がおよそ 0.5 になっている。このことから、初期世代において  $q_1$  が必ず 1 に収束して、 $q_2$  がそれぞれ約半分の確率で 1 か 0 に収束していると推測することができる。また、このように  $q_1$  や  $q_2$  が初期世代に 1 か 0 に収束することは、他のルールの組合せや異なる  $w$  の値でも確認された。



(a) 変動パターン 1 (b) 変動パターン 2

図 6 世代ごとの  $q_1, q_2$  の推移

Fig. 6 Dynamics of  $q_1, q_2$  with generations.

したがって、次回参加拒否ルールによって財の受け取り後の協力確率  $q_2$  が高まるということは、次回参加拒否ルールによって初期世代に  $q_2$  が 1 に収束しやすくなるということであると考えることもできる。

### 3.3 現実の ROSCA 型相互扶助ゲームへの提案として最も適したルールの組合せ

図 2～図 5 を見る限り、最もプレイヤーの平均協力確率を高めたルールの組合せは次のとおり。

【選別ルール，受領権喪失ルール，  
次回参加拒否ルール】の組合せ

この組合せと同程度にプレイヤーの平均協力確率を高めた組合せは次のとおり。

【受領権喪失ルール，次回参加拒否ルール】の組合せ

図 2～図 5 を見れば、受領権喪失ルールが財の受け取り前の協力確率  $q_1$  を高めることは明らかである。同様に、次回参加拒否ルールは財の受け取り後の協力確率  $q_2$  を高めることに大きく貢献していることが分かる。一方で、これら 2 つのルールがある場合には、選別ルールがそれほど大きな効果を発揮していない。ゆえに、これら 2 セットのルールの組合せでは、プレイヤーの平均協力確率にそれほど大きな差異が生まれなかった。また、選別ルールはもともと現実の ROSCA 型相互扶助ゲームで自然発生的に行われていたルールであるため、このルールは非常に複雑で現実への提案に組み込むには不向きである。したがって、複雑さを回避しながら協力確率を高めるような提案としては、【受領権喪失ルール，次回参加拒否ルール】の組合せが最も適しているといえる。

## 4. 考察

### 4.1 本研究の結果と議論

本研究によって、ROSCA 型相互扶助ゲームに関して主に次の 3 つが明らかになった。

1 つ目は、選別ルールと受領権喪失ルールが同時に存在する場合に、財の受け取り前の行動による評判レベルの変動を考慮すると、考慮しないときと比べて財の受け取り後の平均協力確率があまり高くないということである。これは、財の受け取り前の評判レベルの変動を考慮することでプレイヤーの評判レベルが相対的に高くなり、財の受け取り後に協力をしなくてもグループに参加できなくなる可能性が少なくなったからであると考えられる。現実の ROSCA 型相互扶助ゲームでは、たとえ受領権喪失ルールが存在していても参加者が裏切りを働くこともありうるだろう。よって、財の受け取り前の行動によって評判レベルの変動が起これないとは考えにくい。それをふまえると、財の受け取り前の行動による評判レベルの変動を考慮することは、今後の研究にとっても非常に重要であるといえる。

2 つ目は、未来利益がある一定の値よりも大きければ、次回参加拒否ルールは財の受け取り後に裏切りを働くようなフリーライダーを抑制し、協力確率を高めるということである。次回参加拒否ルールとは、Koike ら [11] の検証で抑制しきれていなかった財の受け取り後の裏切りを排除することを目的に本研究で新たに提案したルールである。このルールが存在すると、財の受け取り後に裏切りを働いたプレイヤーが、次のゲームでグループに参加することができなくなる。本研究の結果から、次回参加拒否ルールが現実の ROSCA 型相互扶助ゲームにおいて、財の受け取り後に態度を変えたり行方をくまらしたりするような参加者への罰則として機能するというを示すことができた\*1。

3 つ目は、現実の ROSCA 型相互扶助ゲームへの提案としては、【受領権喪失ルール，次回参加拒否ルール】の組合せが最も適しているということである。プレイヤーの平均協力確率が最高になるのは 3 つすべてのルールを取り入れたときであるが、選別ルールは他 2 つのルールがともに存在する場合にはそれほど大きな効果を生み出さない。また、選別ルールはもともと現実の ROSCA 型相互扶助ゲームで自然発生的に行われていたルールであるため、このルールはその複雑さから提案に組み込むには不向きである。したがって、【受領権喪失ルール，次回参加拒否ルール】の組合せを、十分に協力を促進させるメカニズムとして提案する。これまでの研究では、【選別ルール，受領権喪失ルール】の組合せが協力を促進するために最も優れている

\*1 本研究では参加者が互いの行動をすべて観察できることを前提としたが、現実では必ずしもそうとは限らない。たとえば、財の受け取り後に裏切りを働いたフリーライダーが経歴を偽って再び参加者として現れるケースなども考えられる。そのような可能性については、今後の研究でさらなる議論が必要である。



とされてきたが、本研究における進化シミュレーションによる分析によって、従来の考え方とは異なる新たな知見を生み出すことができたといえるだろう。

本研究では、ROSCA 型相互扶助ゲームにおいて協利行動を促進するメカニズムの提案を行った。実際にこの提案を社会の中に組み込むことができれば、財が分割されずに順番に配られていくような場面において、フリーライダーが発生しにくく、互いに協力し合うことの多い集団を形成することができるようになるかもしれない。特に ROSCA のような金融組織において、次回参加拒否ルールというこれまでに存在していなかったルールの有用性を証明したことで、課題となっていたファンド受領後の資金の不払いを解決することができるようになる可能性がある。

#### 4.2 今後の課題

今後の課題としては、次の2つが考えられる。

1つ目は、選別ルールや受領権喪失ルールが現実の ROSCA 型相互扶助ゲームで自然発生的に行われていたにもかかわらず、本研究で新たに提案した次回参加拒否ルールはなぜこれらのルールと同様に自然発生しなかったのかという疑問である。本研究で示したように次回参加拒否ルールが協利行動の促進に有効であるならば、このルールが実社会の中で自然に形成されていてもおかしくはない。実際に財の受け取り後の裏切りを悩みに抱えている事例は確認されているものの [10]、著者の知る限りでは次回参加拒否ルールのような仕組みが現実で採用されている例は存在しない。それではなぜこれまで次回参加拒否ルールが現実の ROSCA 型相互扶助ゲームにおいて存在していなかったのか、様々な観点から検討してみる必要があるといえる。

2つ目は、ROSCA 型相互扶助ゲームから派生する類似のシステムについても、同様のメカニズムで協利行動を促進することができるのかという疑問である。たとえば ROSCA では、くじではなく入札によって受領順を決定する場合がある [13]。また、早急に資金を必要とする参加者が優先的に受領する場合も確認されている [8]。このような場合、ROSCA 型相互扶助ゲームとは少し異なるシステムのやり取りが現実に行われていることになる。これらについて検証を行った場合、同様の結果が得られるとは限らない。

これらは本研究で扱うことができなかった。ROSCA 型相互扶助ゲームに関する今後の研究において、このような課題についても明らかにされることを期待する。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 16H03120, 17K03761 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

[1] Nowak, M.A. and Sigmund, K.: Evolution of indirect reciprocity by image scoring, *Nature*, Vol.393, pp.573–577 (1998).

[2] Nowak, M.A. and Sigmund, K.: The Dynamics of Indirect Reciprocity, *Journal of Theoretical Biology*, Vol.194, No.4, pp.561–574 (1998).

[3] Cohen, M.D., Riolo, R.L. and Axelrod, R.: The Role of Social Structure in the Maintenance of Cooperative Regimes, *Rationality And Society*, Vol.13, No.1, pp.5–32 (2001).

[4] Santos, F.C., Pinheiro, F.L., Lenaerts, T. and Pacheco, J.M.: The role of diversity in the evolution of cooperation, *Journal of Theoretical Biology*, Vol.299, pp.88–96 (2012).

[5] Axelrod, R.: An Evolutionary Approach to Norms, *American Political Science Review*, Vol.80, No.4, pp.1095–1111 (1986).

[6] Geertz, C.: The Rotating Credit Association: A “Middle Rung” in Development, *Economic Development and Cultural Change*, Vol.10, No.3, pp.241–263 (1962).

[7] Ardener, S.: The Comparative Study of Rotating Credit Associations, *Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, Vol.94, No.2, pp.201–229 (1964).

[8] 泉田洋一：農村金融の発展と回転型貯蓄信用講 (ROSCAs)–日本における講の役割, 宇都宮大学農学部学術報告, Vol.15, No.1, pp.1–18 (1992).

[9] 櫻井徳太郎：櫻井徳太郎著作集 1 講集団の研究, 吉川弘文館 (1988).

[10] 辻本昌弘, 國吉美也子, 與久田巖：沖縄の講集団にみる交換の生成, *社会心理学研究*, Vol.23, No.2, pp.162–172 (2007).

[11] Koike, S., Nakamaru, M. and Tsujimoto, M.: Evolution of cooperation in rotating indivisible goods game, *Journal of Theoretical Biology*, Vol.264, pp.143–153 (2010).

[12] Sugden, R.: *The Economics of Rights, Co-operation and Welfare*, 2nd ed., London: Palgrave Macmillan (2004).

[13] 中丸麻由子, 小池心平：集団における協力の構造と協力維持のためのルール—進化シミュレーションと聞き取り調査, 亀田辰義編：「社会の決まり」はどのように決まるか (フロンティア実験社会科学), 勁草書房, pp.49–83 (2015).



矢澤 直人

1995年生。2018年筑波大学理工学郡社会学類社会経済システム主専攻卒業。同年筑波大学大学院システム情報工学研究科社会学専攻入学。



秋山 英三 (正会員)

1998年東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了。博士(学術)。1998年日本学術振興会特別研究員, 1999年慶應大学理工学部助手。2000年米国サンタフェ研究所研究員。2001年筑波大学社会学系に着任。現在、筑波大学システム情報系教授。専門は進化ゲーム理論・被験者経済実験。