
特集 「計算社会科学」・論文

レギュラーネットワーク上の規範と 協力の共進化ダイナミクス

An analysis of co-evolution dynamics of norms and cooperation in regular networks

キーワード：

協力の進化 間接互惠性 社会的ジレンマ 規範ノックアウト手法 エージェントベースドシミュレーション

keyword：

Evolution of cooperation, Indirect reciprocity, Social dilemma, Norm knockout method, Agent-based simulation

立正大学 山本 仁志
Rissho University Hitoshi YAMAMOTO

要 約

互恵的な協力は人間社会の持続的な発展の重要な基盤である。基礎的な互恵的協力として「過去において自身に協力した他者には協力する」という直接互惠が存在する。一方で、直接的な見返りが期待できない見知らぬ人間同士でも安定して協力行動を維持する仕組みは関係の流動性の高い現代において極めて重要になりつつある。このような協力が安定して成立するためには、非協力的な人だけが得をしないように、良い人と悪い人とを判断する評価ルール（規範）が必要であり、有効な規範の精緻な分析が進められてきた。しかし多くの先行研究は単一の規範が社会で共有されるという前提を置いており、多様な規範が混在する中からどのような規範が社会で受け入れられるのか、更には社会のネットワーク構造が規範の進化に与える影響は未解明の課題であった。そこで本研究ではエージェントシミュレーションを用いて多様な規範が存在する規範エコシステムをモデル化し、規範と協力の共進化過程がネットワーク構造によってどのような影響を受けるのかを分析した。その結果これまで協力を実現できないと

原稿受付：2019年11月3日

掲載決定：2019年11月13日

されてきた規範が、相互接続の次数が高い社会において協力が進化するためには必須であることがわかった。この結果は協力社会の実現のためには協力を維持する方策だけでなく、協力の進化過程において必要な規範についても検討する必要性を示している。

Abstract

Despite extensive studies on the evolution of cooperation in indirect reciprocity, little is known about which social norms are favored in a process of evolution of society. Because most previous studies rely on an assumption which a single norm is shared in all members of society. However, different people often follow different norms, which lead to different opinions of the same person. To address this issue, this paper considers the situation where various norms coexist in society as “a norm ecosystem” and clarify the roles of each norm in this ecosystem. In addition, the effect of the network structure of society on the evolution of the norm has been an unsolved problem. The paper analyzes how the co-evolution process of norms and cooperation is affected by the network structure. The results show that norms that had been considered impossible to achieve cooperation were indispensable for the evolution of cooperation in societies with a high degree of connection. These results indicate that in order to realize a cooperative society, it is necessary to consider not only measures to maintain cooperation but also norms necessary for the evolution of cooperation.

1 はじめに

社会における相互協力は人類の発展において重要な基盤であると同時に実現が困難な課題でもある。特に個人間ないし個人と集団間で利害が対立する場面において、如何にして協力的な関係を構築し維持していくかは古典的でありながら (Hardin, 1968) 今なお課題が出現し続ける今日的な課題であり続けている。こうした社会的ジレンマ状況において相互協力的な関係が進化するメカニズムの解明は、今日においても人類が解くべき重要な課題として残されている (Kennedy & Norman, 2005)。

また近年の情報技術の発展により人々の過去の行動履歴や人間関係は広範に観測可能となり、これらを用いて人々の信用や評価を社会システムとして共有するという試みも実用化され始めている (後藤・本田, 2018; 大屋, 2019)。一方で、インターネットが社会のあらゆる場面に浸透することで、多様な価値観や規範が混在・共存する環境が出現している。こうした高度かつ複雑な情報環境において人々の相互協力が如何にして実現可能であるかを検討することは社会情報学の重要な課題といえる。

協力行動の進化メカニズムについては、原始的には血縁選択 (Hamilton, 1964) や自分を助けてくれた他者を助けるという直接互惠が協力行動を促進するという幅広い知見がある (Trivers, 1971; Axelrod & Hamilton, 1981)。しかし関係の流動性が大きい人間社会でより一般的に重要となるのは、誰かを助けた他者を助けるという間接互惠であり、近年多くの研究がなされている (Alexander, 1987; Sugden, 1986; Kandori, 1992; Wedekind & Milinski, 2000; Panchanathan & Boyd, 2004)。更に相互作用にネットワーク構造を導入することの効果も知られている (Nowak, 2006)。ネットワーク構造を導入した多くの先行研究では懲罰やパートナー

選択、ネットワークの張替えなどと組み合わせた分析が行われている (Brandt *et al.*, 2003; Sylwester & Roberts, 2013; Chen *et al.*, 2012; Gallo & Yan, 2015)。

間接互惠を支える基本的なメカニズムは、ヒトが良いヒトと悪いヒトを効果的に分別する規範をもち、良いヒトにのみ協力するという傾向を持つことによって支えられている。これまでに様々な協力を安定させる規範が提案されてきた (Sugden, 1986; Nowak & Sigmund, 1998; Wedekind & Milinski, 2000; Kandori, 1992; Pacheco *et al.*, 2006; Takahashi & Mashima, 2006; Sasaki *et al.*, 2017)。また、協力の維持に頑健な規範を網羅的に探索した研究も存在する (Ohtsuki & Iwasa, 2006)。しかし規範そのものとネットワーク構造の関係についてはごくわずかな研究しかなされていない (Sasaki *et al.*, 2017)。

更に多くの先行研究では社会である一つの規範が共有されているという前提をおいている。しかし現実の社会において他者を評価する規範が単一であるとは考えられず、実験によっても人によって異なる評価ルールが採用されていることが確認されている (Swakman *et al.*, 2016; Okada *et al.*, 2018)。複数の規範の混在に関する理論的な分析は近年になって試みられるようになってきたが (Uchida & Sigmund, 2010; Yamamoto *et al.*, 2017; Uchida *et al.*, 2018), これらの研究はネットワーク構造の影響を検討していない。

本研究では複数規範の混在環境を規範エコシステムとしてモデル化し、規範エコシステムにおいてネットワーク構造の導入がどのような影響を与えるかをエージェントベースシミュレーション (Gilvert & Troitzsch, 1999) によって分析する。本研究は間接互惠の基本的なモデルであるギビングゲームを用いてネットワーク構造を持つ社会で協力と規範が共進化するメカニズムを明らかにする。

図1はモデルの概念図である。エージェントはドナーとレシピエントに割り当てられギビングゲームをおこなう。この時ドナーが協力を選ぶとコストを払ってレシピエントに利得を与えることになる。全てのドナーが協力を選べば社会全体の利得はパレート優位になるが、コストを払わないドナーのほうが利得は高くなるので、このゲームは社会的ジレンマの構造を持つ。一方でドナーの行動は他のエージェントに観察される。観察者は自身の規範を用いてドナーの評価（善悪）を更新する。他者から良いと判断されたドナーは次に自身がレシピエントになったときに協力されることになる。この仕組みが間接互惠である。エージェントはレギュラーネットワーク上に配置され、ネットワーク上で連結されたエージェントと相互作用しながら自身の規範を進化させる。規範の時間発展と社会の協力率を観察することで規範と協力の共進化の過程を分析することができる。

また、本研究では規範エコシステムにネットワーク構造を導入する最初のステップとして、次数の効果を分析することを目的とする。そのためネットワーク構造はレギュラーネットワークに限って分析することとする。

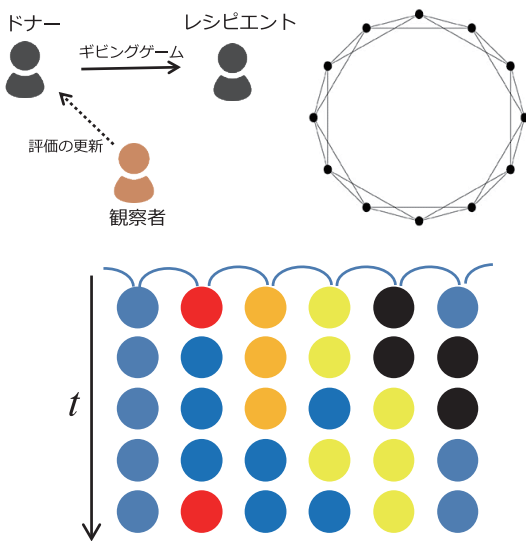


図1 モデルの概念図

2 モデル

2.1 シミュレーションモデルの構築

本節では、多様な規範が存在する環境下における協力の進化を分析するために、ギビングゲームを用いた規範エコシステムのエージェントベースシミュレーションモデルを構築する。社会は N 個体のエージェントで構成され、それぞれのエージェントは次数 d のレギュラーネットワーク上に配置される。エージェント i とエッジが張られたエージェントの集合をエージェント i の近傍 E_i とする。 E_i は i 自身を含む。シミュレーションは1試行が G 世代で構成される。1世代は R ラウンドで構成される。

1ラウンドのゲームはギビングゲームフェーズと評価フェーズで構成される。ギビングゲームフェーズでは、集団からランダムに選ばれたエージェント i がドナーとなり、 E_i からランダムに選択されたエージェント j をレシピエントとしてギビングゲームをおこなう。ドナーはGoodと評価しているレシピエントに「協力 (C)」し、Badと評価しているレシピエントに対しては「非協力 (D)」を選択する。ドナーが協力を選択すると、ドナーは c のコストを支払い、レシピエントは b ($b > c > 0$) の利益を得る。ドナーが非協力を選択すると両者の利得は変化しない。ドナーは確率 q で行動エラーをおこす。行動エラーは協力と非協力の行動が反転することで表現される。

このゲームを i を除く E_i に含まれるエージェントが観察し、ドナー i に対する評価をアップデートする。これが評価フェーズである。観察者 (k とする) は2種類の情報を用いてドナー i の評価を更新する。 k は i の行動 (C/D) とレシピエント j に対する k の評価を用いて i の評価を更新する。 k が i の評価を更新する際確率 p で認知エラーをおこす。認知エラーは評価の結果のGoodとBadが反転することで表現される。上記のギビングゲームフェーズと評価フェーズを全てのエージェントが

1回ずつドナーとなるよう繰り返し1ラウンドが終了する。

2.2 エージェントの規範

エージェントの持つ規範は表1のように表現され、エージェントは4ビットで表現される規範を持つ。第1ビットは、GoodなレシピエントにCをとったドナーに対する評価であり、向社会的な行動に対する評価ルールを表す。第2ビットは、BadなレシピエントにCをとったドナーに対する評価であり、寛容な行動に対する評価ルールを表す。第3ビットは、GoodなレシピエントにDをとったドナーに対する評価であり、反社会的な行動に対する評価ルールを表す。第4ビットは、BadなレシピエントにDをとったドナーに対する評価であり、懲罰的な行動に対する評価ルールを表す。

表1：エージェントの規範

		観察者 k からみたレシピエント j のイメージ	
		Good	Bad
ドナー i の行動	C	1 st bit: (G/B)	2 nd bit: (G/B)
	D	3 rd bit: (G/B)	4 th bit: (G/B)

この記法を用いることでこれまでよく知られている規範を次のように記述することができる(表2)。ドナーの行動のみを用いて判断する単純な規範がImage scoring (IS) (Nowak & Sigmund, 1998) である。ドナーの行動に加えてレシピエントのイメージを用いる規範としては次の3種類がよく知られている。最も非寛容な規範として知られているShunning (SH) (Takahashi & Mashima, 2006) は良いレシピエントへの協力のみをGoodと判断する。Stern judging (SJ) (Kandori, 1992; Pacheco *et al.*, 2006) は悪いレシピエントへの協力(甘やかし)はBadと判断し、悪いレシピエントへの非協力(正当化され

る裏切り)はGoodと判断する。Simple standing (Sugden, 1986; Leimar & Hammerstein, 2001) は甘やかしもGoodと判断し、良い個人への非協力のみをBadと判断する

表2：代表的な規範の一覧

ドナーの行動	C	C	D	D
レシピエントのイメージ	G	B	G	B
Shunning (SH)	G	B	B	B
Stern judging (SJ)	G	B	B	G
Image scoring (IS)	G	G	B	B
Simple standing (ST)	G	G	B	G

2.3 進化過程

全てのエージェントが1回ずつドナーとしてゲームを行うことで1ラウンドが終了し、 R ラウンドのゲームの後、エージェントの規範は利得を適応度とした遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて進化する。エージェントは親となるエージェントを E_i から2体ルーレット選択によって選ぶ。あるエージェント i がルーレット選択によって親として選ばれる確率 π_i は(1)式のように記述される。

$$\pi_i = (U_i - U_{\min})^2 / \sum_j (U_j - U_{\min})^2 \quad (1)$$

U_i はエージェント i がその世代で得た累積利得であり、 U_{\min} は E_i 中の全エージェントが得た利得のうち最小の値である。選ばれた2体の親から一様交叉によって新たな子孫の遺伝子が生成される。また、確率 m で各遺伝子座の値が反転することで突然変異を表現する。

2.4 規範ノックアウト手法

協力の進化における必須規範を明らかにするため規範ノックアウト手法 (Yamamoto *et al.*, 2017) による分析を用いて協力の進化に必須となる規範を分析する。規範ノックアウト手法は遺伝工学で用いられる遺伝ノックアウト手法 (Strepp *et al.*, 1998) の技法を社会シミュレー

ションに応用したものである。遺伝ノックアウト手法は、ある生物に機能欠損型の遺伝子を導入するという遺伝子工学の技法であり、配列は既知であるが、機能がよくわかっていない遺伝子を研究するときに用いられる。研究者は、ノックアウト個体と正常個体との相違から、遺伝子の機能について推論する。社会シミュレーションにおいて、特定の規範を表現する遺伝子配列だけ集団から排除する方法を採用して、その規範が協力の進化において重要な役割を果たす必須規範であるかどうかを明らかにする。

規範ノックアウト手法は以下のように実装される。ある特定の規範を表す遺伝型は各世代の最初に取り除かれる。具体的には、エージェントの規範が進化の結果ノックアウトされる規範と同一になった際には、他の15タイプの規範へとランダムに変更される。その結果、ノックアウトされた規範は、常に集団内に1エージェントも存在しない。

2.5 シミュレーションパラメータ

本研究のシミュレーションで採用したパラメータを表3に示す。

3 結果

3.1 回数と規範ノックアウトの効果

第一に規範生態系において適応的となる規範を分析する。図2は様々な回数における規範の進化の時間的发展を示している ($b=5$, $p=q=0$)。各パネルが1回の試行の結果であり、パネルの縦方向にシミュレーション時間が進んでいる。本論文では多数の規範が共存する状況を分析するため代表的な規範をカラーで表現し視覚化している。具体的にはBBBBで表現される常に非協力的な規範は黒、GGGGは緑、GBBB(SH)は赤、GBBG(SJ)はオレンジ、GGBB(IS)は水色、GGBG(ST)は黄緑で表現されている。またその他の規範で第1ビットがGのものは白、第1ビットがBのものは

表3：シミュレーションパラメータ

変数	説明	変数型	初期値
Agent			
Norm	エージェントの規範	16 types	ランダム
Image	他者への評価	バイナリ(G/B)	G
Payoff	1世代で得た累積利得	実数	0
p	認知エラー	Constant	{0, 0.01}
q	行動エラー	Constant	{0, 0.01}
Environment			
N	集団サイズ	Constant	400
d	ネットワーク回数	Constant	[2, 400]
	1試行の世代数	Constant	500
R	1世代に行われるギビングゲームのラウンド数	Constant	400
b	協力で得られる利得	Constant	[1.5, 6.0]
c	協力のコスト	Constant	1
m	突然変異率	Constant	0.01

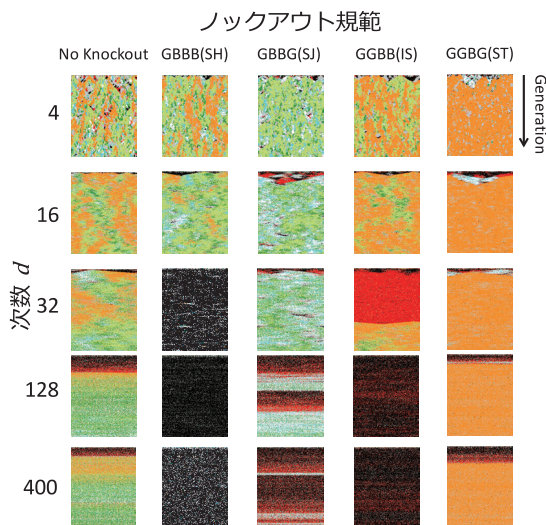


図2：規範の進化過程の空間的パターン

灰色に統一した。

図2左から1列目の結果は規範ノックアウト手法を用いない場合の結果である。つまり16種類すべての規範が存在している。このとき次数が低いときにはSJ(オレンジ) やST(黄緑) などの規範が共存していることがわかる。一方次数が高くなるにつれSJは観測されず黄緑や緑の混在によって社会が構成されている。左から2列目はSHをノックアウトした結果を示している。次数が低いときには同様にいくつかの協力的な規範が混在しているが次数が高くなるにつれ非協力が支配的になっている。続いてSJをノックアウトした場合、次数が高くなるにつれ非協力が支配する時間が長くなるが、協力支配のフェーズと非協力支配のフェーズが交互に生じている。ISをノックアウトした場合はSHと同様に次数が高くなると非協力支配になる。対照的にSTをノックアウトした場合は、低次数の時からSJが支配的となって安定している。

3.2 エラーと次数の影響

前節の結果はある特定のパラメータにおける1回のシミュレーション結果を示している。では行

動や認知にエラーがあった場合適応的な規範は如何に変化するであろうか。また次数や協力で得られる利得の大きさの効果を網羅的に分析する必要がある。

図3は協力時の利得 b と次数 d を変化させたときの社会全体の協力率を示している。協力率は異なる乱数種で50回試行を行い、500世代時点の協力率の平均によって算出した。上段が認知エラー・行動エラーともない環境の結果であり、下段がエラーを導入した環境の結果である。カラーチャートは青が協力率1に対応し、黒が協力率0に対応する。規範ノックアウト手法を用いない場合、エラーの有無にかかわらず多くの領域で協力が支配的になっている。次数が高く利得が低いときにのみ非協力支配となっている。この環境は完全なランダムマッチングかつ協力のコストが高いことを意味している。多数の規範が混在し更に協力への誘因が低い非常に厳しい環境では協力の進化は困難であることがわかる。

SHをノックアウトした場合は次数が高い環境で利得の大きさに関わらず非協力が支配的となっている。つまり次数が低い環境ではSHが存在しなくても協力は進化できるが次数の高い環境ではSHは協力の進化に必須であることがわかる。相互作用の範囲が広くランダムな相手と次々にやり取りをする環境で協力が進化するためには社会にSH規範の存在が必要である。

SJをノックアウトした場合はエラーの有無によって様相が異なる。エラーがある環境ではノックアウトを用いない場合とほぼ同様の結果となっている。つまりこの環境ではSJの存在は協力の進化に影響を与えていない。しかしエラーがないときには完全ネットワークに近いときのみSJが協力の進化に必要となっている。

ISをノックアウトした場合はSHとほぼ同様の結果である。つまり次数の高い環境においてISはSHと同様に協力の進化に必須であることがわかる。

STをノックアウトした場合はエラーの有無に

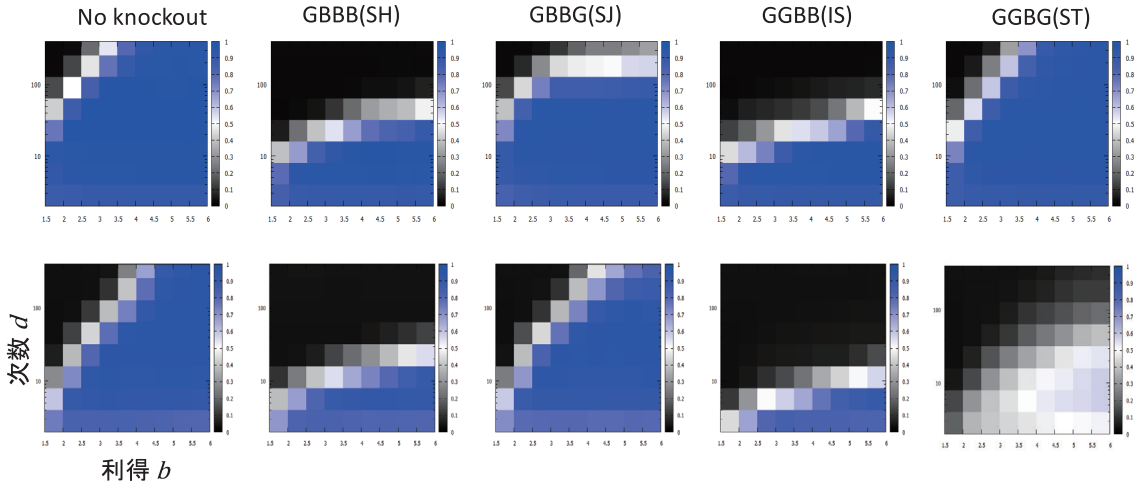


図3：ネットワーク構造と協力率

よって様相が大きく異なる。エラーがない場合はノックアウトを用いない場合と同様の結果である。図2からわかるようにSTをノックアウトした場合にはSJが支配的な規範となっている。つまりSTがいなくてもSJによって協力が安定的に維持されていることがわかる。しかしエラーがある場合には協力の進化がほぼ見られない。他のケースでは常に協力が支配的となる次数が低く利得が高い領域であっても協力が安定することはない。エラーのある環境でSTの存在が欠けたとき何が起こるのであろうか？

3.3 Simple Standingの重要性

図4はSTをノックアウトした場合のエラーの有無による規範の時間発展である。上段のエラーが無い場合の結果は図1最右列に対応している。もっとも特徴的な違いはエラーがある場合SJがほとんど存在しないことである。SJがエラーに脆弱であることは知られているが (Uchida & Sasaki, 2013), これまでは単一の規範が社会で共有される前提においての脆弱性が検討されていた。しかし規範が多数存在する環境においてもSJはエラーに脆弱であることがわかった。一方エラーがない場合にはSJは非常に頑健かつ安定的

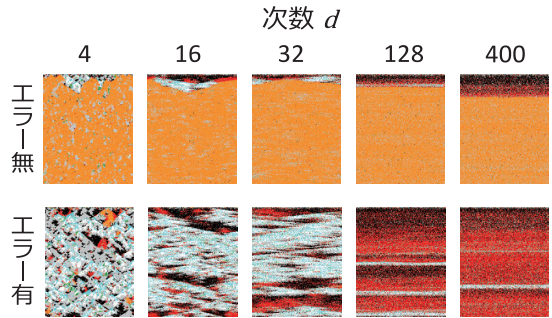


図4：ST規範ノックアウト時のエラーの影響

に協力を維持することがわかる。

しかしなぜ、エラーがある環境ではSTがひとつ欠けただけで協力が安定しないのであろうか。協力的な社会に非協力的なフリーライダーが侵入するのを防ぐためには非協力的な個体をBadと評価し協力的な個体と峻別する必要がある。例えばGGGGで表現される完全協力者はどんな相手に対しても協力してしまうために協力の維持に貢献できない。ISはGGBBで表現される規範でありもっともシンプルな間接互惠規範である。しかしISは安定的に協力を維持することができないことが知られている。なぜならISは協力を必ずGoodと評価し非協力を必ずBadと評価する。つまり、誰に対して行動したかを考慮していない。

そのため、あるドナーが悪い評判の個体に対して非協力的行動をとった際にも、その行動をBadと判断してしまうためいったん非協力的行動が発生すると非協力の連鎖が止められなくなるのである。

つまりここで重要となるのは、悪い個体に対する非協力は正当化される、という評価ルールである。この評価ルールを持つ規範はSJとSTのみである⁽¹⁾。SJがエラーに対して脆弱なため正当化される非協力をGoodと評価して非協力の侵入を防ぐためにはSTが必要となるのである。

4 考察

本研究の結果から示される洞察は大きく4つにまとめることができる。第一が協力の進化ダイナミクスを分析する重要性である。これまでの研究は社会である一種類の規範が共有される前提の上で協力を安定させることができる規範を探求していた。その文脈においてSHやISは進化的に安定な規範ではないことが明らかになっている。しかし規範と協力の共進化過程において、これらの両規範が存在しなければ協力が創発することはないことが明らかになった。これは規範エコシステムを用いたアプローチによって初めてわかることである。

第二がST規範の重要性である。ST規範はBadな個体への非協力をGoodと判断する。これは集団がフリーライダーの侵入に頑健であるためには、フリーライダーを排除するだけでなくフリーライダーを排除する個体を守る必要があることを意味する。一方でST規範のように行動の情報（1次情報）だけでなく行動の相手の情報（2次情報）を用いるという複雑な情報処理を実際に人間が行っているかどうかは議論が分かれるところでもある（Milinski *et al.*, 2001；真島, 2015；Swakman *et al.*, 2016；Okada *et al.*, 2018）。理論的には2次情報を用いるST規範の存在が必須となるが、実際の人間の情報処理との間に如何な

る乖離があるのか、もしくは集団内に2次情報を活用する人々がある程度含まれていれば良いのかといった現実社会との接合を今後検討する必要がある。

第三は社会構造と社会規範の関係を分析する重要性である。シミュレーション結果からネットワークの構造によって必要となる規範が異なることがわかった。これは社会の繋がりパターンによって互恵的な協力をもたらす社会規範が異なることを示唆している。今日、社会にはオンライン・オフラインを問わず多種多様なコミュニティが多層的に存在している。またそれらは互いに相互作用しつつ動的に変化している。こうした複雑な社会システムを健全に維持し発展させるためには相互協力が必須となるが、その実現のために構造と規範を同時に分析することの重要性を本研究の結果は示唆している。

第四は規範ノックアウト手法の手法的な重要性である。Yamamotoら（Yamamoto *et al.*, 2017）が開発したこの手法は複雑な社会システムにおいてある特定の個人や集団が果たしている役割を分析する手法として応用範囲が広い。この手法をさらに発展させることで間接互恵のみならず協力の進化研究をさらに推し進めることが可能となろう。

5 まとめ

本研究ではネットワーク上の間接互恵性による規範と協力の共進化ダイナミクスを分析するために規範エコシステムをモデル化し、それぞれの規範の役割とネットワーク構造の影響を分析した。シミュレーションの結果から、ローカルな繋がり限定された低次数社会では様々な規範が小さなコロニーを形成しつつ協力を安定させることがわかった。一方で多くの人とランダムな相互作用が生じる高次数社会では協力が進化するためにはいくつもの必須となる規範が存在することがわかった。その中でもShunning規範とImage scoring規

範は単独では協力を安定させることができないが協力の進化過程には重要な役割を果たしていることがわかった。

本研究は規範エコシステムにネットワーク構造を導入する第一歩の試みである。そのため多くの検討すべき課題が残っている。第一にネットワーク構造の多様性の導入である。本研究では次数の効果に着目するためにネットワークを特徴付ける他の要素を捨象して分析をおこなった。しかし不均質なネットワークが協力の進化に与える影響の研究も多く存在するため (Santos & Pacheco, 2005; Rong *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2008; 石田他, 2007), 間接互惠性においてもこの影響は今後探求されるべきである。また、確信的な個人の存在も検討すべき課題として残っている。社会には周囲の環境によらず自身の意見を変えない個人や集団も存在する (安野, 2006)。こうした人々の行動や彼らが下す評価は集団全体の意見分布にも影響を与え得る。当然、間接互惠における規範においてもこのような確信的な個人の影響は考慮されるべきである。協力の進化における理論的研究でも常に単一の行動をとり続けるエージェントの効果は検討されており (Matsuzawa *et al.*, 2016; Yamamoto & Okada, 2016), 確信的な個人が社会全体の規範に与える影響の分析も重要な課題と言えよう。

注釈

- (1) 良い個体に対する協力はGood, 良い個体に対する非協力はBadというルールを固定すると、正当化される非協力をGoodと評価する規範はGBBGまたはGGBGのみとなる。これはSJとSTを指す。

謝辞

稿執筆にあたり貴重なコメントを頂いた岡田勇氏 (創価大学), 内田智士氏 (倫理研究所), 佐々木達矢氏 (F-Power) に深く感謝する。また本研

究の一部はJSPS科研費 (17H02044, 18H03498, 19H02376, 19K21570) の助成を受けている。

参考文献

- Alexander, R. (1987). *The biology of moral systems*. Aldine de Gruyter, New York.
- Axelrod, R., & Hamilton, W.D. (1981). The evolution of cooperation. *Science*, 211, 1390-1396.
- Brandt, H., Hauert, C., & Sigmund, K. (2003). Punishment and reputation in spatial public goods games. *Proceedings of the royal society of London. Series B: biological sciences*, 270(1519), 1099-1104.
- Chen, X., Schick, A., Doebeli, M., Blachford, A., & Wang, L. (2012). Reputation-based conditional interaction supports cooperation in well-mixed prisoner's dilemmas. *PLoS One*, 7(5), e36260.
- Gallo, E., & Yan, C. (2015). The effects of reputational and social knowledge on cooperation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(12), 3647-3652.
- Gilvert, N., & Troitzsch, K. (1999). *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press.
- 後藤晶 & 本田正美. (2018). 監視カメラの社会的許容度に関する一考察. *社会情報学*, 6(3), 63-78.
- Hamilton, W.D. (1964). The genetical evolution of social behaviour. ii. *Journal of theoretical biology*, 7(1), 17-52.
- Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons. *science*, 162(3859), 1243-1248.
- 石田芳文, 山本仁志, 岡田勇 & 太田敏澄. (2007). ネットワーク構造がもたらす協調の頑健性と脆弱性. *コンピュータ ソフトウェア*, 24(1),

- I_70-1_80.
- Kandori, M. (1992). Social norms and community enforcement. *The Review of Economic Studies*, 59(1), 63-80.
- Kennedy, D., & Norman, C. (2005). What don't we know? *Science*, 309(5731), 75-75.
- Leimar, O., & Hammerstein, P. (2001). Evolution of cooperation through indirect reciprocity. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 268(1468), 745-753.
- 真島理恵. (2015). 間接互惠性状況での人間行動. In 亀田達也 (Ed.), 「社会の決まり」はどのように決まるのか (p. 117-147). 勁草書房.
- Matsuzawa, R., Tanimoto, J., & Fukuda, E. (2016). Spatial prisoner's dilemma games with zealous cooperators. *Physical Review E*, 94(2), 022114.
- Milinski, M., Semmann, D., Bakker, T.C., & Krambeck, H.-J. (2001). Cooperation through indirect reciprocity: image scoring or standing strategy? *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 268(1484), 2495-2501.
- Nowak, M.A. (2006). Five rules for the evolution of cooperation. *Science*, 314 (5805), 1560-1563.
- Nowak, M.A., & Sigmund, K. (1998). Evolution of indirect reciprocity by image scoring. *Nature*, 393(June), 573-577.
- Ohtsuki, H., & Iwasa, Y. (2006). The leading eight: social norms that can maintain cooperation by indirect reciprocity. *Journal of theoretical biology*, 239(4), 435-44.
- 大屋雄裕. (2019). 個人信用スコアの社会的意義. 情報通信政策研究, 2(2), 15-26.
- Okada, I., Yamamoto, H., Sato, Y., Uchida, S., & Sasaki, T. (2018). Experimental evidence of selective inattention in reputation-based cooperation. *Scientific reports*, 8(1), 14813.
- Pacheco, J.M., Santos, F.C., & Chalub, F.A.C. (2006). Stern-judging: A simple, successful norm which promotes cooperation under indirect reciprocity. *PLoS computational biology*, 2(12), e178.
- Panchanathan, K., & Boyd, R. (2004). Indirect reciprocity can stabilize cooperation without the second-order free rider problem. *Nature*, 432, 499-502.
- Rong, Z., Li, X., & Wang, X. (2007). Roles of mixing patterns in cooperation on a scale-free networked game. *Physical Review E*, 76(2), 027101.
- Santos, F.C., & Pacheco, J.M. (2005). Scale-Free Networks Provide a Unifying Framework for the Emergence of Cooperation. *Physical Review Letters*, 95(9), 098104.
- Santos, F.C., Santos, M.D., & Pacheco, J.M. (2008). Social diversity promotes the emergence of cooperation in public goods games. *Nature*, 454(7201), 213-216.
- Sasaki, T., Okada, I., & Nakai, Y. (2017). The evolution of conditional moral assessment in indirect reciprocity. *Scientific reports*, 7, 41870.
- Sasaki, T., Yamamoto, H., Okada, I., & Uchida, S. (2017). The Evolution of Reputation-Based Cooperation in Regular Networks. *Games*, 8 (1), 8.
- Strepp, R., Scholz, S., Kruse, S., Speth, V., & Reski, R. (1998). Plant nuclear gene knockout reveals a role in plastid division for the homolog of the bacterial cell division protein FtsZ, an ancestral tubulin. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(8), 4368-4373.

- Sugden, R. (1986). *The Economics of Rights, Cooperation and Welfare*. Oxford: Basil Blackwell.
- Swakman, V., Molleman, L., Ule, A., & Egas, M. (2016). Reputation-based cooperation: Empirical evidence for behavioral strategies. *Evolution and Human Behavior*, 37(3), 230-235.
- Sylwester, K., & Roberts, G. (2013). Reputation-based partner choice is an effective alternative to indirect reciprocity in solving social dilemmas. *Evolution and Human Behavior*, 34(3), 201-206.
- Takahashi, N., & Mashima, R. (2006). The importance of subjectivity in perceptual errors on the emergence of indirect reciprocity. *Journal of theoretical biology*, 243(3), 418-36.
- Trivers, R.L. (1971). The evolution of reciprocal altruism. *The Quarterly review of biology*, 35-57.
- Uchida, S., & Sigmund, K. (2010). The competition of assessment rules for indirect reciprocity. *Journal of theoretical biology*, 263(1), 13-19.
- Uchida, S., & Sasaki, T. (2013). Effect of assessment error and private information on stern-judging in indirect reciprocity. *Chaos, Solitons & Fractals*, 56, 175-180.
- Uchida, S., Yamamoto, H., Okada, I., & Sasaki, T. (2018). A theoretical approach to norm ecosystems: two adaptive architectures of indirect reciprocity show different paths to the evolution of cooperation. *Frontiers in Physics*, 6, 14.
- Wedekind, C., & Milinski, M. (2000). Cooperation through image scoring in humans. *Science*, 288(5467), 850-852.
- Yamamoto, H., & Okada, I. (2016). How to keep punishment to maintain cooperation: Introducing social vaccine. *Physica A*, 443, 526-536.
- Yamamoto, H., Okada, I., Uchida, S., & Sasaki, T. (2017). A norm knockout method on indirect reciprocity to reveal indispensable norms. *Scientific Reports*, 7(1), 44146.
- 安野智子. (2006). 重層的な世論形成過程: メディア・ネットワーク・公共性. 東京大学出版会.