

協力を生み出す規範と維持する規範：規範ノックアウト手法を用いたエージェントシミュレーションによる分析

○山本仁志 (立正大学) 岡田勇 (創価大学) 内田智士 (倫理研究所) 佐々木達矢 (F-Power)

An analysis of a norm ecosystem for promoting and maintaining cooperative regimes

*H. Yamamoto (Rissho Univ.), I. Okada (Soka Univ.), S. Uchida (RINRI Institute) and T. Sasaki (F-Power Inc.)

概要— 互恵的な協力行動は人間社会を維持するための重要な基盤である。互恵的協力が機能するためには他者が協力的な人間かどうかを判断するための規範が必要となる。これまで多くの理論的な研究が協力行動が安定するために必要な規範を探求し、いくつかの代表的な規範が協力を安定させることがわかっている。しかしながらこれまでの研究の多くは社会に単一の規範が共有されることを前提にしている。一方現実的には多様な規範が混在し社会を構成している。よって、現実をより深く理解する上で、多様な規範の混在状態で協力が進化可能なのか、また協力を進化させ安定させる規範にはどのような特徴があるのかを分析する必要がある。そこで我々は社会に様々な規範が混在する状況を規範エコシステムとしてモデル化し各々の規範が協力の進化において果たす役割をエージェントベースシミュレーションを用いて調べた。分析の結果、Shunning 規範と Image Scoring 規範は協力の進化の際には必須であるが協力社会が実現した後は必要とされない規範であることが明らかになった。更に、Simple Standing 規範は安定した協力状態から取り除くことで協力が崩壊してしまうことも明らかとなった。我々は前者を Pioneer 規範、後者を Keystone 規範と呼ぶ。

キーワード: 規範エコシステム, 協力の進化, 間接互恵性, エージェントシミュレーション, 規範ノックアウト手法

1 はじめに

ヒトは直接的な見返りが期待できない他者に自分がコストを払って協力をすることがある。こうしたコストのかかる協力行動の進化は、「情けは人のためならず」という諺が示すように、現在の協力が良い評判として他者に共有され、いずれ将来、別の他者からの協力を引き出すという仕組みで理解することができる。このような仕組みは一般に間接的互恵性と呼ばれ多くの研究がおこなわれている^{1, 2, 3, 4, 5)}。上記のような仕組みが協力の基盤として機能するためには、ヒトが良いヒトと悪いヒトを効果的に分別する規範を持ち、良いヒトにのみ協力する傾向を持つ必要がある。

これまでの間接互恵性の理論では、「協力行動は良く非協力行動は悪い^{6, 7)}」(Image Scoring, "IS"), 「悪いヒトに協力することは悪く、悪いヒトに非協力することは良い^{3, 8)}」(Stern Judging, "SJ"), 「悪いヒトに対してであっても協力は良いことで、悪いヒトに非協力することも良い^{2, 9, 10)}」(Simple Standing, "SS")とといったいくつかの規範が協力行動を安定させることが知られている。

多くの間接互恵性研究は関係流動性の高い現代社会において協力的な関係を安定させる規範を探求してきた。理論的なアプローチでは、社会である単一の規範が共有される状況を仮定し、どのような規範が協力を安定させるかが調べられている。代表的には、Ohtsuki & Iwasa は^{11, 12)}は 4096 種類の規範のうち 8 つのみが協力を安定させることができることを示した。ここで「安定」とは対象とする規範が純粋な裏切りと純粋な協力者に侵入されないということを示す。多くの理論的研究もまた特定の規範が完全非協調と完全協調の 2 つの行動ルールに侵入されないかどうかに着目している^{12, 13, 14)}。しかしこのアプローチは複数種類の規範間の競争を扱うことができない。

また実験的なアプローチによっても人が間接互恵的状

況でどのような規範を持つのかは探求されてきた^{4, 15)}。初期のアプローチでは人は他者の過去の行動によって協力するかどうかを判断する Image Scoring^{6, 7)}を採用していると指摘されてきた。近年ではより詳細な実験が実施され、個人によって参照する情報が様々であることがわかってきた¹⁶⁾。また他者の過去の行動と評判の 2 つの情報を用いることで高い協力率が達成されることも示されている¹⁷⁾。

現実社会のように様々な規範が混在する環境における協力の進化を分析するためには、複数の規範間の競争を取り入れなくてはならない。特に近年の社会では、インターネットの大衆化・国境のボーダレス化などの要因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。従来はそれぞれの集団や社会で共有されていた規範が混在することで、一方から見た向社会的行動が他方からは反社会的行動と判断され相互が激しく対立する等、規範の対立は致命的な社会問題を引き起こしている。多様な規範が混在し時には対立する環境で如何にして協力的な社会を構築するかという課題は現代社会における喫緊の課題である。

複数規範間の競争に着目した研究はごく少数の規範間の競争を扱ったものに限られてきた^{18, 19)}。一方で近年、多数の規範が混在する環境下でどのようなメカニズムで協力が進化するのかを明らかにした研究^{20, 21)}もあらわれている。本研究では、社会に様々な規範が混在する状況を「規範の生態系 (規範エコシステム)」として捉え、この生態系の中で各規範がどのような役割を果たしているのかを明らかにする。

規範エコシステムにおいて協力が進化し安定する過程を分析する上では二つの視点が必要となる。一つが規範の混在状態もしくは非協力が支配的な状態から協力的な行動が進化するために必要となる規範が存在するのかどうかであり、他方が協力的社会が実現した後にその状態を維持するために必要な規範が存在するの

かどうかである。

前者は協力が創発するために必要な規範といえる。生態系には Pioneer 種と呼ばれる、荒廃した環境に最初に根付きその後の生態系の発展に貢献する生物種が存在する²²⁾。例えば火山による溶岩流に覆われた土地に最初に侵入する植物などが典型的な Pioneer 種である。これらの生物種が存在しなければ、森林等の生態系が成長することは困難である。本研究では、Pioneer 規範を規範エコシステムにおいて取り除いてしまうと協力が創発することができない規範と定義する。

Yamamoto *et al.*²⁰⁾ は Pioneer 規範を発見するために規範ノックアウト手法を開発し、前者の視点から、協力が創発するための Pioneer 規範を発見した。規範ノックアウト手法は遺伝工学で用いられる Gene Knockout²³⁾ の技法からインスパイアされたシミュレーション技法であり、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ことで、その規範が協力の進化において重要な役割を果たす Pioneer 規範であるかどうかを分析することができる。

本研究では二つの視点のうち後者の、協力を維持するために必要な規範に着目する。生態系には Keystone 種と呼ばれる、比較的少ない生物量でありながらも生態系へ大きな影響を与える生物種が存在する^{24, 25, 26)}。Keystone 種は安定した生態系からその種を取り除くと生態系が崩壊してしまう種を指す。例えば海中のケルブの森におけるラッコや河川にダムを築くビーバーなどは典型的な Keystone 種である。本研究では、Keystone 規範を規範エコシステムにおいて取り除いてしまうと協力を維持することができない規範と定義する。規範ノックアウト手法を用いて協力が安定した社会から特定の規範を取り除くことで、協力が崩壊するのかどうかを分析し Keystone 規範を明らかにする。また Pioneer 規範と Keystone 規範を比較する事で協力の進化にそれぞれの規範が果たす役割を明らかにすることができる。

Fig. 1 は Pioneer 規範分析と Keystone 規範分析の概念図である。

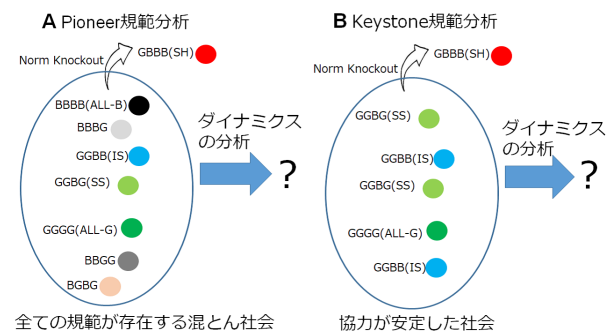


Fig. 1: Pioneer 規範・Keystone 規範分析の概念図: (A) Pioneer 規範分析ではすべての規範が存在する混とん状態から協力が創発するために必要な規範を分析する。そのために社会の初期状態で特定の規範をノックアウトして協力が進化するか分析する。(B) Keystone 規範分析では協力が安定した状態を維持するために必要な規範を分析する。そのためすべての規範が存在する状態からシミュレーションを実行し協力が安定した状態を実現する。その後特定の規範をノックアウトして協力の維持が可能かどうかを分析する。

2 モデル

2.1 シミュレーションモデルの概要

本節では、多様な規範が存在する環境下で協力の進化を分析するために、giving game 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。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、集団のなかからランダムなエージェントがドナーとして選択される。ドナーには集団の中からランダムにレシピエントが割り当てられる。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。

このゲームを他のエージェントは観察し、ドナー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 (i とする) は2種類の情報を用いてドナーとレシピエント (それぞれ j, k とする) の評価を更新する。 i は j の行動 (C/D) とレシピエント k に対する i の評価を用いて j の評価を更新する。 i が j 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

i の持つ規範は Table 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。

Table 1: エージェントの規範: 観察者 i がドナー j を評価する時の規範はドナー j の行動とレシピエント k のイメージの組み合わせで表現され、BBBB と GGGG を含む16通りの規範が存在する。

		k 's image from i	
		Good	Bad
j 's behavior	C	(G/B)	(G/B)
	D	(G/B)	(G/B)

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 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は $\Pi_i = (U_i - U_{min})^2 / \sum_j (U_j - U_{min})^2$ で記述される。 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 規範ロックアウト手法の実装

規範ロックアウト手法は以下のように実装される。規範ロックアウト手法を採用する時には、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 Knockout 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、Knockout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 Pioneer 規範分析と Keystone 規範分析

Pioneer 規範分析は次のように実行される。シミュレーションの第一世代の時点で規範ロックアウト手法を用いる。その結果、社会には常にロックアウトした規範以外の15種類の規範しか存在しないことになる。この操作によって規範の混在状態から協力が創発する際にある特定の規範の存在が必須であるかどうかを検討することができる。

他方で Keystone 規範分析は次のように実行される。シミュレーションの第一世代の時点ではすべての規範が存在する。16種類のすべての規範が存在する状態でシミュレーションを実行すると協力が進化することが先行研究で示されている²⁰⁾。協力が進化した安定した協力状態が作られた状態となる1,000世代が経過した時点で規範ロックアウト手法を用いる。その結果、協力が安定した社会からある特定の規範を取り除いても協力は維持可能なのか否かを分析できる。この操作によってある規範が協力の維持に必要な Keystone 規範であるかどうかを検討することができる。

2.6 シミュレーションパラメータ

本論文における主なパラメータセットは次に示す通りである。Norm はエージェントが持つ規範であり、シミュレーション開始時に各エージェントに16種類の規範がランダムに割り当てられる。また各エージェントが他のエージェントに対して持つイメージは各世代の開始時に Good で初期化される。エージェントの利得は各世代の開始時に0で初期化される。突然変異率 m 、認知エラー p 、行動エラー q 、集団規模 N 、一世代のラウンド数 R 、協力のコスト c 、協力により得られる利得 b はそれぞれ定数であり以下の値を用いる。 $m = 0.01, p = 0.01, q = 0.01, N = 400, R = 400, c = 1, b = 5$ 。一回の試行における世代数 G については Pioneer 規範分析では1000世代であり、Keystone 規範分析では2000世代である。これは Keystone 規範分析においては十分に協力社会が安定した後に規範ロックアウト手法を適用しその後のダイナミクスを観察するためである。

3 結果

3.1 Pioneer 規範分析と Keystone 規範分析

Fig.2 は Pioneer 規範分析と Keystone 規範分析の結果である。Pioneer 規範分析については Yamamoto *et al.*²⁰⁾ と同様に、GBBB(SH), GGBB(IS), GGBG(SS) が Pioneer 規範となっている。これらの規範が存在しない環境では協力が進化することができない。一方 Keystone 規範分析の結果は、GGBG(SS) をロックアウトしたときだけ協力が崩壊している。つまり Keystone 規範は SS だけである。SH ならびに IS は Pioneer 規範であるが Keystone 規範ではない。我々は Pioneer 規範であるが Keystone 規範でない規範を、協力の進化には必要であるが安定した社会では光が当たることのない *Unsung Hero* 規範と呼ぶ。

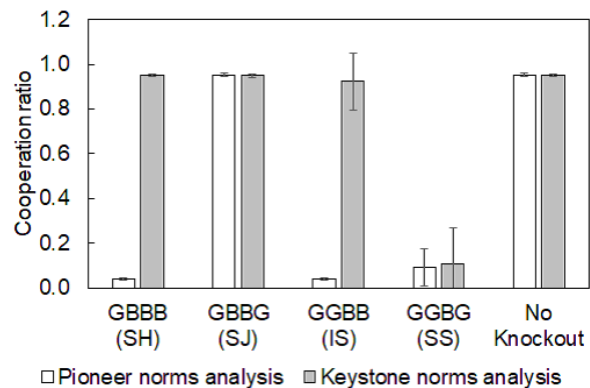


Fig. 2: Pioneer 規範・Keystone 規範分析の結果：代表的な規範をロックアウトした時の最終世代における協力率の平均を示す。試行数は50試行でありエラーバーは標準偏差を表す。Pioneer 規範分析においては SH, IS, SS をロックアウトすると協力が進化しないが、Keystone 規範分析では SS のみが協力の維持に必要であり SH, IS はロックアウトしても協力が維持されている。

3.2 ダイナミクスの分析

Fig.3 パネル A に示すように SH をロックアウトした Pioneer 規範分析では協力は進化できないことがわかる。SH が存在しない環境では初期に裏切り支配となり BBBB(ALLB) に侵入できる規範が存在しないため協力が進化することはない。一方、パネル B に示すように Keystone 規範分析の結果では協力は安定している。1000世代目に SH がロックアウトされるが、協力的な規範である GGGG(ALLG), GGGB, GGBG(SS), GGBB(IS) の4規範の混在状態で協力は頑健に維持される。

一方 Fig.4 パネル A, B に示すように SS をロックアウトした場合、Pioneer 規範分析と Keystone 規範分析のいずれにおいても協力社会が実現できない。Pioneer 規範分析においてシミュレーションの最初から SS をロックアウトした時には、SH が ALLB に対して優位に立つもののその状態から協力が安定する状況には進化できない。SH は Good な相手に対する協力のみを Good と判断するため他の規範が Bad な相手に対して協力した時や、Bad な相手に非協力した時など全てを Bad と判断し協力しない。更にはエラーで非協力をとった SH に対してもその後非協力をとるため SH だけでは協力

は進化することができない。SJ や IS は存在するもののこれらの規範もエラーに対して脆弱であり、安定した協力状態を維持することができない。

更に Keystone 規範分析において協力が安定した状態で SS をロックアウトした場合も協力は崩壊してしまう。ALLG は無条件で協力するため ALLB 等の非協力規範の侵入に脆弱であり、GGGB は Good に対する非協力も Good と判断してしまう規範であり協力の維持には貢献できない。IS は前述の通りエラーに脆弱であるため、SS がいない状態では協力を維持することができる規範が存在しない。

3.3 全規範の Pioneer 規範分析と Keystone 規範分析

続いて BBBB と GGGG を含む全 16 種類の規範をロックアウトした分析をおこなう。Table 2 は 16 種類の全規範をロックアウトした Pioneer 規範分析と Keystone 規範分析の結果である。Pioneer 規範分析では SH, IS, SS が Pioneer 規範であることがわかる。Keystone 規範分析では SS のみが Keystone 規範であることがわかる。GGBB(IS), GGGB, GGGG(ALLG) は協力社会では GGBG(SS) と共存しているが SS 以外はロックアウトしても協力社会が崩壊することはない。つまり進化の結果得られた協力的な社会を観察するとこれら 4 種類の規範の共存が観察されるが、そのうち協力の維持に必要な規範はひとつのみである。また協力社会を観察すると SH は存在していない。しかし SH が最初から存在しない環境では協力社会は実現しないのである。また IS も協力社会から取り除いても影響はないが IS が最初から存在しない環境ではやはり協力が進化することはできない。

Table 2: 最終世代における協力率の平均 (SD): 協力率が 0.2 を下回るものは赤くハイライトされている。Pioneer 規範分析では 1000 世代後の協力率の平均, Keystone 規範分析では 2000 世代後の協力率の平均を示している。両分析とも試行回数は 50 回である。

Knockout	Pioneer 規範分析	Keystone 規範分析
BBBB(ALLB)	0.799 (0.322)	0.951 (0.006)
BBBG	0.951 (0.007)	0.950 (0.006)
BBGB	0.951 (0.006)	0.949 (0.007)
BBGG	0.952 (0.006)	0.951 (0.006)
BGBB	0.950 (0.006)	0.951 (0.006)
BGBG	0.950 (0.008)	0.951 (0.006)
BGGB	0.951 (0.006)	0.951 (0.007)
BGGG	0.951 (0.007)	0.952 (0.006)
G BBB(SH)	0.041 (0.005)	0.952 (0.007)
G BBG(SJ)	0.951 (0.008)	0.949 (0.008)
G BGB	0.948 (0.007)	0.951 (0.006)
G BGG	0.948 (0.008)	0.950 (0.008)
G GBB(IS)	0.039 (0.005)	0.924 (0.127)
G GBG(SS)	0.091 (0.085)	0.109 (0.158)
G GGB	0.938 (0.008)	0.935 (0.010)
G GGG(ALLG)	0.635 (0.410)	0.880 (0.174)
No KO	0.952 (0.007)	0.950 (0.006)

4 まとめ

本論文では間接互惠を基盤とした協力が進化するために必要となる規範を分析した。既存の理論的研究では、社会である単一の規範が共有されるという前提がおかれていたため、多様な規範が混在する環境で協力が進化するメカニズムを分析することができなかった。そこで我々は社会に様々な規範が混在する状況を規範エコシステムとして捉え、エージェントベースシミュレーションによって協力の進化メカニズムを分析した。

本論文では Yamamoto *et al.*²⁰⁾ が開発した規範ロックアウト手法を応用し、非協力が支配的な環境から協力が進化するために必要な規範と、協力が支配的な環境で協力を維持するために必要な規範のふたつを明らかにした。前者には SH, IS, SS が該当し、後者には SS が該当する。

特に SH, IS の 2 つの規範は裏切りが支配的な社会において協力行動を生み出し進化させるためには必須となるが協力が安定した社会では生き残れなかったり少数しか存在できない。Yamamoto *et al.*²⁰⁾ はこれらの規範を *Unsung Hero* 規範と呼んだが、本研究で行った Keystone 規範分析によって *Unsung Hero* 規範は協力が安定した社会では完全に排除されても協力に影響を与えないことが明らかになった。

これは協力的な社会システムを維持するために重要な示唆を与えると考えられる。つまり SH, IS のような規範は協力が安定した状態で観察すると社会に貢献しない規範であるため、こうした規範を持つ個人や役割は適応的でないとして排除されてしまう恐れがある。しかし、社会が非協力状態になったときにはこれらの規範が存在しなくては協力社会を再び構築することは不可能になってしまう。規範エコシステムを分析することで社会における規範の多様性の維持が安定かつ持続可能な協力社会にとって重要な意味を持つことが示唆された。

また SJ は Pioneer 規範でも Keystone 規範でもないことがわかった。Yamamoto *et al.*²⁰⁾ ではエラーの存在しない環境では、SJ は協力が進化する際に一時的な多数派規範となり非協力社会から協力社会への推移に重要な役割を果たしていた。しかし SJ はエラーに対して脆弱なことが指摘されており²⁷⁾、エラーがありかつ多様な規範が混在する環境では協力の進化や維持に重要な役割を果たすことができない。SJ は Bad に対する協力 (甘やかし) は Bad と判断し、Bad に対する非協力 (懲罰) を Good と判断するため 2 次情報を最も精緻に活用する規範である。規範エコシステムにおける SJ の役割は今後探求すべき課題である。

本研究ではドナーの行動とレシピエントの評判という 2 つの情報を組み合わせた規範を検討した。一方で、実験的な研究においては人々が実際に 2 つの情報を使うのかどうかについての議論がなされている^{4, 15, 16)}。本モデルでは他者を評価する際の情報処理コストは無視しているが、今後の発展として評判の利用にコストを導入することでより現実的な規範エコシステムの分析をおこなう必要がある。また、相互作用や学習の範囲に構造を導入したモデルも提案されているが、Image Scoring だけを扱った研究^{28, 29)} や複数規範を扱っているものの純粋非協調と純粋協調と対象とする規範の 3

者のみが存在するモデル³⁰⁾に留まっている。規範エコシステムを複雑ネットワーク上に拡張することも今後の課題である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15KT0133 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Alexander, R. *The Biology of Moral Systems* (Aldine de Gruyter, New York, 1987).
- 2) Sugden, R. *The Economics of Rights, Cooperation and Welfare* (Oxford: Basil Blackwell, 1986).
- 3) Kandori, M. Social norms and community enforcement. *Rev. Econ. Stud.* **59**, 63/80 (1992).
- 4) Wedekind, C. & Milinski, M. Cooperation through image scoring in humans. *Science* **288**, 850/852 (2000).
- 5) Panchanathan, K. & Boyd, R. Indirect reciprocity can stabilize cooperation without the secondorder free rider problem. *Nature* **432**, 499/502 (2004).
- 6) Nowak, M. A. & Sigmund, K. Evolution of indirect reciprocity by image scoring. *Nature* **393**, 573/577 (1998).
- 7) Nowak, M. A. & Sigmund, K. The dynamics of indirect reciprocity. *J. Theor. Biol.* **194**, 561/574 (1998).
- 8) Pacheco, J. M., Santos, F. C. & Chalub, F. A. C. Stern-judging: A simple, successful norm which promotes cooperation under indirect reciprocity. *PLoS Comput. Biol.* **2**, e178 (2006).
- 9) Leimar, O. & Hammerstein, P. Evolution of cooperation through indirect reciprocity. *Proc. R. Soc. Lond. B* **268**, 745/753 (2001).
- 10) Panchanathan, K. A tale of two defectors: the importance of standing for evolution of indirect reciprocity. *J. Theor. Biol.* **224**, 115/126 (2003).
- 11) Ohtsuki, H. & Iwasa, Y. How should we define goodness? -reputation dynamics in indirect reciprocity. *J. Theor. Biol.* **231**, 107/120 (2004).
- 12) Ohtsuki, H. & Iwasa, Y. The leading eight: social norms that can maintain cooperation by indirect reciprocity. *J. Theor. Biol.* **239**, 435/44 (2006).
- 13) Brandt, H. & Sigmund, K. The logic of reprobation: Assessment and action rules for indirect reciprocity. *J. Theor. Biol.* **231**, 475/486 (2004).
- 14) Ohtsuki, H. & Iwasa, Y. Global analyses of evolutionary dynamics and exhaustive search for social norms that maintain cooperation by reputation. *J. Theor. Biol.* **244**, 518/531 (2007).
- 15) Milinski, M., Semmann, D., Bakker, T. C. M. & Krambeck, H.-J. Cooperation through indirect reciprocity: image scoring or standing strategy? *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **268**, 2495/2501 (2001).
- 16) Swakman, V., Molleman, L., Ule, A. & Egas, M. Reputation-based cooperation: Empirical evidence for behavioral strategies. *Evol. Hum. Behav.* **37**, 230/235 (2016).
- 17) Bolton, G. E., Katok, E. & Ockenfels, A. Cooperation among strangers with limited information about reputation. *J. Public Econ.* **89**, 1457/1468 (2005).
- 18) Uchida, S. & Sigmund, K. The competition of assessment rules for indirect reciprocity. *J. Theor. Biol.* **263**, 13/19 (2010).
- 19) Uchida, S. Effect of private information on indirect reciprocity. *Phys. Rev. E* **82**, 036111 (2010).
- 20) Yamamoto, H., Okada, I., Uchida, S. & Sasaki, T. A norm knockout method on indirect reciprocity to reveal indispensable norms. *Sci. Rep.* **7**, 44146 (2017).
- 21) Uchida, S., Yamamoto, H., Okada, I. & Sasaki, T. A Theoretical Approach to Norm Ecosystems : Two Adaptive Architectures of Indirect Reciprocity Show Different Paths to the Evolution of Cooperation. *Front. Phys.* **6**, 14 (2018).
- 22) Swaine, M. D. & Whitmore, T. C. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. *Vegetatio* **75**, 81/86 (1988).
- 23) Strepp, R., Scholz, S., Kruse, S., Speth, V. & Reski, R. Plant nuclear gene knockout reveals a role in plastid division for the homolog of the bacterial cell division protein ftsz, an ancestral tubulin. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **95**, 4368/4373 (1998).
- 24) Paine, R. T. A note on trophic complexity and community stability. *Am. Nat.* **103**, 91/93 (1969).
- 25) Mills, L. S. & Doak, D. F. The Keystone-Species Concept in Ecology and Conservation. *Bioscience* **43**, 219/224 (1993).
- 26) Bond, W. J. Keystone Species. In *Biodivers. Ecosyst. Funct.*, 237/253 (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1994).
- 27) Uchida, S. & Sasaki, T. Effect of assessment error and private information on stern-judging in indirect reciprocity. *Chaos Solitons Fractals* **56**, 175/180 (2013).
- 28) Peleteiro, A., Burguillo, J. C. & Chong, S. Y. Exploring Indirect Reciprocity in Complex Networks using Coalitions and Rewiring. In *Proc. 2014 Int. Conf. Auton. Agents Multi-Agent Syst.*, 669/676 (2014).
- 29) Liu, A., Wang, L., Zhang, Y. & Sun, C. Coevolution of cooperation and complex networks via indirect reciprocity. In Liu, D., Xie, S., Li, Y., Zhao, D. & El-Alfy, E.-S. M. (eds.) *Neural Information Processing*, 919/926 (Springer International Publishing, Cham, 2017).
- 30) Sasaki, T., Yamamoto, H., Okada, I. & Uchida, S. The Evolution of Reputation-Based Cooperation in Regular Networks. *Games* **8**, 8 (2017).

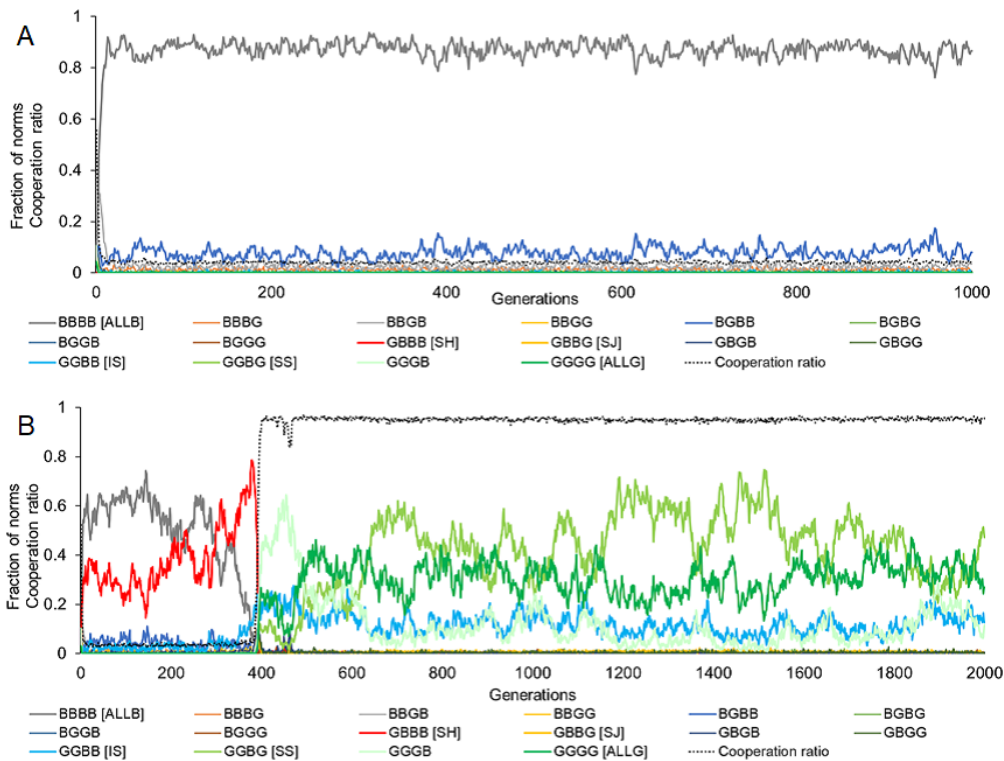


Fig. 3: SHに関するPioneer規範分析(A)とKeystone規範分析(B):x軸は世代でありy軸は各規範の人口比と協力率を示す。実線で各規範の人口を表し黒の点線は協力率を表す。Pioneer規範分析では0世代でSHがロックアウトされ、Keystone規範分析では1000世代でロックアウトされている。Pioneer規範分析ではSHがロックアウトされているためALLBに侵入できる規範が存在しないため協力は進化しない。協力が進化した後にはSHは存在することができない。そのためKeystone規範分析でSHをロックアウトしても協力は安定的に維持される。

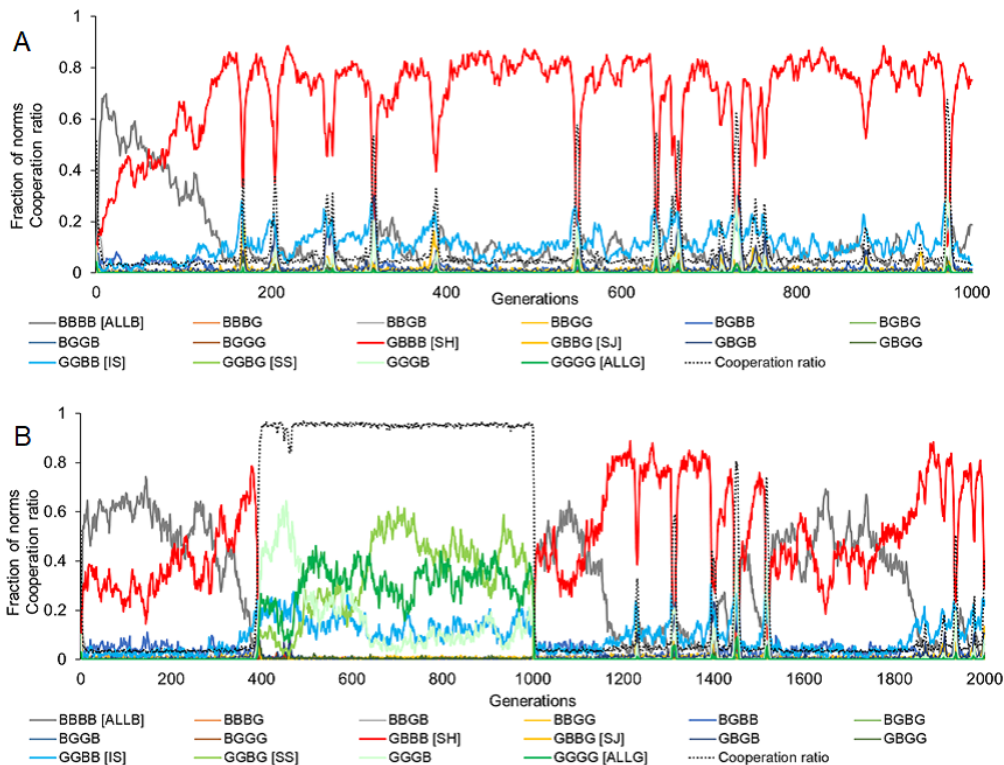


Fig. 4: SSに関するPioneer規範(A)とKeystone規範分析(B):x軸は世代でありy軸は各規範の人口比と協力率を示す。実線で各規範の人口を表し黒の点線は協力率を表す。Pioneer規範分析では0世代でSSがロックアウトされ、Keystone規範分析では1000世代でロックアウトされている。SSはPioneer規範分析においてもKeystone規範分析においてもロックアウトされると協力状態が実現しない。