

ゲーム理論における社会的ジレンマの可視化 — 互惠ルールがもつ協力行動の促進メカニズム —

伊東 啓, 谷本 潤

協力（利他）行動の進化と促進のメカニズムを解明するために、ゲーム理論（進化ゲーム）は精力的に研究されてきた。特に 2×2 （2人プレイヤー：2戦略）の利得表で規定されるペアワイズゲームはさまざまな科学領域において広く扱われており、その研究の主眼は、プレイヤーが互いに協力行動の促進を妨げる“社会ジレンマ”を乗り越えて協力的社会を構築することができるかという点にある。社会的ジレンマに直面したときに、人間を含むさまざまな生物はどのようにしてジレンマ状況から脱し、互惠関係を確立するのだろうか。ここではわれわれが開発したジレンマ強度を可視化する手法（ジレンマ位相面：Dilemma phase-plane）から、それぞれの互惠ルールが互いに社会的ジレンマを緩和して、協力行動を促進させるのかを示す。

キーワード：進化ゲーム、ペアワイズゲーム、利得行列、互惠ルール、ジレンマ位相面

1. はじめに

ゲーム理論および進化ゲームは、ヒトを含む生物の協力（利他）行動の進化や促進のメカニズムを解明するために精力的に研究されてきた [1–7]。その中でも 2×2 （2人プレイヤー：2戦略）の利得表で規定されるペアワイズゲーム (Pairwise game) は広く扱われ、多くの研究成果が上げられている [8, 9]。ゲーム理論研究の主眼は、“意思決定者が社会的ジレンマに直面したときに、どのようにして社会的ジレンマの状況から脱し、互惠関係を確立するのか”という点にあり、これは多分野に跨るゲーム理論研究における重要な争点である [7–9]。

2. 社会的ジレンマとは

社会的ジレンマ (Social dilemma) とは、個人の合理的な選択が社会全体の最適な選択と一致しないために生じる葛藤のことである（社会的ジレンマの正確な定義は Dawes [10] も参照）。社会的ジレンマはゲーム理論の領域で盛んに研究されてきた研究課題であり、身近に起こるさまざまな状況に当てはまる。

たとえば車を運転しているとき、自分が早く目的地に到着したいからといって強引な車線変更や合流をしようとする、結果的に多くの他人が巻き込まれる交通

渋滞に繋がる。これは、「いち早く目的地に到着する」という自己利益の最大化（の積み重ね）が、社会全体の効率性を損なわせるという交通流における社会的ジレンマである [11]。

また感染症を例にすれば、ワクチン接種行動の背景にも社会的ジレンマが存在する。インフルエンザが流行する季節を前にして、予防接種をするか否か悩んだ経験はないだろうか。ワクチンを打つか打たないか決める際、第一に考慮する点はワクチンの効果とさまざまなコスト（費用、副反応、病院に行く時間など）の間にある費用対効果だが、実際にはさらに「なにも自分自身がコストを支払ってまでワクチンを打たなくても、多くの他者がワクチンを打ってくれば、集団免疫¹によって自分は感染症に罹りにくくなる。」というワクチンを打たない合理的な理由が浮かんでくる。つまり、「ワクチンを打たずに感染症にも罹らない」という自己利益の最大化を狙う人が増えることで、集団内のワクチン接種者割合が低下し、結果的に集団免疫が獲得されないことで多くの感染者が出るという公衆衛生の社会的ジレンマである [13]。

ほかにも、誰もが自由に利用できる状態にある共有資源（放牧場・漁場など）を利己的に奪い合うことで、過剰な搾取と資源の劣化（枯渇や消耗）が起こる“共有地の悲劇 (Tragedy of the commons)” というコンセプトがあるが、これも社会的ジレンマの問題として漁業経済学や保全生態学で盛んに取り扱われてきた [14, 15]。

いとう ひろむ

長崎大学熱帯医学研究所国際保健学分野
〒 852-8523 長崎県長崎市坂本 1-12-4
ito.hiromu@nagasaki-u.ac.jp

たにもと じゅん

九州大学総合理工学研究院環境理工学部門
〒 816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1
tanimoto@cm.kyushu-u.ac.jp

¹ ワクチンには、接種した本人が免疫を獲得するという直接的効果のほかに、ワクチンを打った人が感染源にならないことでその周囲にいる人の暴露機会も減少するという間接的な防御効果がある。これにより集団が感染症の流行を予防できるほど高い免疫保持率をもっている状態のことを、集団が「集団免疫」をもっているという [12]。

表 1 利得表

	相手	協力	裏切り
自分			
協力		R	S
裏切り		T	P

これらはいずれも、個人にとって合理的な行動が最終的には社会システムの効率を落としてしまうような状況、つまり社会的ジレンマが世界には溢れていることを意味している。そのため、社会的ジレンマの緩和・解消を実現する互恵関係の理論的背景を解明することが、協力的で効率的な社会構造を実現するためには不可欠になる。

3. ペアワイズゲーム

ゲーム理論で広く扱われるのは、ペアワイズゲームである。ペアワイズゲームとは、プレイヤーが「協力 (Cooperation, C)」と「裏切り (Defection, D)」の2戦略をもつゲームであり、互いの戦略が決定された際の利得が 2×2 の利得表 (表 1) および利得行列 (式 (1)) で表現される。なおここでは、無限のよく混合された (well-mixed) 集団を仮定しており、無限の集団からランダムに2人の個人 (プレイヤー) が選ばれ、ゲームをして、プレイヤーは選択した戦略に応じて利得を受け取るものとしている。

$$A = [a_{ij}] = \begin{pmatrix} R & S \\ T & P \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、利得 R, S, T, P はそれぞれ、Reward (自他の戦略が共に協力だったとき)、Sucker (自分は協力したが、相手が裏切ったとき)、Temptation (自分は裏切ったが、相手が協力したとき)、Punishment (自他の戦略が共に裏切りだったとき) の頭文字であり、各戦略の組み合わせに対応する [9]。

4. 社会的ジレンマの強度

これまでの研究から、社会的ジレンマには二種類が存在することがわかっている [16]。その一つは、「相手を搾取しようとするジレンマ (Gamble-intending dilemma, GID)」であり、もう一つは、「相手から搾取されまいとするジレンマ (Risk-averting dilemma, RAD)」である。ここで、GID の強さを D'_g 、RAD の強さを D'_r とすれば、各々をペアワイズゲームの利得表内の要素: R, S, T, P から下記の式で表すことができる。

$$D'_g = \frac{T - R}{R - P} \quad (2)$$

$$D'_r = \frac{P - S}{R - P} \quad (3)$$

なお、定義から

$$T = R + (R - P)D'_g \quad (4)$$

$$S = P - (R - P)D'_r \quad (5)$$

とも表すことができる。

5. ゲーム構造

さらにこのペアワイズゲームは、大別して四つのゲーム構造に分類することができる。ここでは利得表内の要素 (R, S, T, P) の大小関係と、社会的ジレンマの強度から分類していく (図 1)。

5.1 囚人のジレンマ (PD game)

囚人のジレンマ (Prisoner's dilemma, 以下 PD) は最も知名度のあるゲームである (図 1 赤背景 (右上))。このゲームでは、二人のプレイヤーが互いに自分の利得を最大化しようと行動した結果、二人にとって最も良い状態 (互いに協力する戦略) が存在するにもかかわらず、結局はそれよりも悪い状態 (互いに裏切る戦略) に陥る。

ここでは簡単な説明に留めるが、このプレイヤーにとって最も良い状態のことを「パレート最適 (Fair Pareto optimum)」と呼び、最終的に陥る均衡 (各プレイヤーの最適戦略の組み合わせ) のことを「ナッシュ均衡 (Nash equilibrium)」と呼ぶ。つまり、PD においてパレート最適は互いに協力し合った場合 (C, C) だが、ナッシュ均衡は互いに裏切り合う (D, D) である。故にプレイヤーにとっては常に裏切りが支配戦略となり、パレート最適は実現しない。

PD は利得表内の大小関係で表すと、 $T > R > P > S$ で表現される。つまりこれは GID (相手を搾取しようとするジレンマ) と RAD (相手から搾取されまいとするジレンマ) という両方の社会的ジレンマを内包するゲーム構造であり ($D'_g > 0, D'_r > 0$)、最も協力的行動が促進しづらいゲームである。

5.2 チキンゲーム (Chicken game)

チキンゲーム (Chicken game) という名称は、度胸試しのゲームとして馴染みがある (図 1 黄背景 (左上))。二人のプレイヤーが互いに別々の車を駆り、向かい合わせで直進し、衝突を避けるために先にハンドルを切ったプレイヤーをチキン (臆病者) と呼んで屈辱と共に敗者とするゲームである。相手がハンドルを

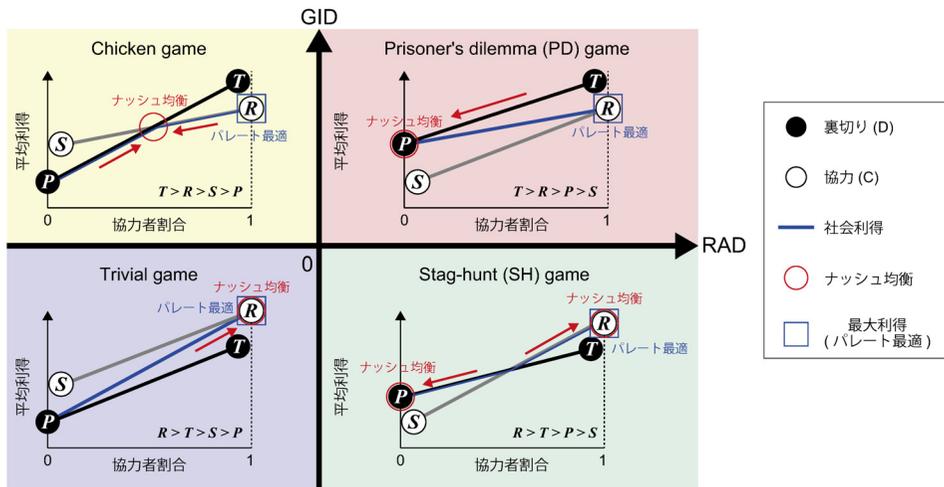


図 1 ゲーム構造とジレンマ強度の関係 (Tanimoto [7] より改変)
 RAD を横軸に、GID を縦軸にすると、両方のジレンマ強度をもつ PD が第一象限になり、GID のみもつ Chicken が第二象限に、ジレンマのない Trivial が第三象限になり、RAD のみ内包する SH が第四象限になる。

切ってくれればいいが、両者とも強情だと正面衝突してしまい、互いに無事では済まない。このように二人のプレイヤーが互いに強硬な行動を取り続けると悲劇的な結末を迎えてしまうが、相手の戦略次第でこちらの最適な戦略が変わる点が PD と異なる。チキンゲームでは相手が裏切れば協力し (D, C)、相手が協力するのなら裏切る (C, D) という二つの組み合わせがナッシュ均衡になる。

チキンゲームは、 $T > R > S > P$ で表現されるゲームで、これは GID (相手を搾取しようとするジレンマ) だけを内包するゲーム構造である ($D'_g > 0$, $D'_r < 0$)。

5.2.1 ハト・タカゲーム (Hawk-Dove game)

進化の文脈からハト・タカゲームにも触れておこう。進化ゲーム理論の中で特に有名なものに、ハトタカゲーム (Hawk-Dove game) があり、これは一般的にチキンゲームの構造をもつ。このゲームでは強硬なタカ (裏切り) と平和的なハト (協力) という二つの戦略があり、互いにその場にある資源を欲しがっている。タカ同士が出会うと怪我のコストを支払ってでも戦って資源を奪い合うが、ハト同士が出会うと平和的に資源を分け合う。そしてタカとハトが出会ったときは、ハトは逃げて、タカが資源を独り占めしてしまう。このようなゲーム状況では、集団内にハトが多ければタカが資源を難なく獲得することができるが、タカが多い状況ではタカ同士の戦いが頻発して消耗してしまう。タカとハトのどちらが増えるかを考えた場合、利得表の要素を適応度 (個体が生きて残す子供の数) とし

て扱えば、ハトが多ければタカの適応度が高く、タカが多ければハトの適応度が高くなるため、ハトとタカの占める人口割合はある値に落ち着く。これは進化的安定戦略 (Evolutionary Stable Strategy: ESS) と呼ばれ、生態学や進化生物学においてよく研究されている [4]。

5.3 スタッグハントゲーム (SH game)

スタッグハントゲーム (Stag-hunt game, 以下 SH) は、鹿狩りゲームとも呼ばれる (図 1 緑背景 (右下))。二人で協力して大物 (鹿) を狩るか、協力せずに一人で小物の獲物 (ウサギ) を狩るかを決めるゲームで、その戦略の最適性は初期状態である協力者割合の初期値に大きく依存する。このような状況では、他者がウサギを狩っている中では自分だけで大物を狩ることはできないし、他者が鹿を狩ろうとしているにもかかわらず自分は一人でウサギを狩ってしまったら大きな利益を得る機会を失ってしまう。つまり、みんなと同じ戦略を採用したほうが良いゲームということになる。したがってこのゲームは、相手が協力するのであればこちらも協力し (C, C)、相手が裏切るのであればこちらも裏切る (D, D) という二つのナッシュ均衡をもつ双安定なゲームである。

SH ゲームは、 $R > T > P > S$ で表現されるゲームであり、これはチキンゲームとは逆に、RAD (相手から搾取されまいとするジレンマ) のみを内包するゲーム構造である ($D'_g < 0$, $D'_r > 0$)。

5.4 トリビアルゲーム (Trivial game)

このゲームはそもそもゲーム状況ではないかも知れないが、社会的ジレンマが生まれぬゲームである (図 1 青背景 (左下)). $R > T > S > P$ で表現されるこのゲームでは、パレート最適とナッシュ均衡のいずれも互いに協力する (C, C) であり、二つある社会的ジレンマ強度のいずれも負になる ($D'_g < 0$, $D'_r < 0$).

6. 協力的行動の謎

このように、現実社会で起こるさまざまな社会的ジレンマの状況を上手く説明するためにいくつかの主要なゲームが開発されてきた。ここで重要なことは、「自身はコストのかかる協力を回避しつつ、他の協力者の社会的恩恵を受けることができる裏切り戦略は、進化上のアドバンテージを得ることができる」という点である。これは進化的な文脈で言えば、「裏切り者は協力者の恩恵にただ乗りすることで協力者よりも多くの子供を残すことができる (適応度を高くできる)」ということであり、自然選択を経て、社会の構成員は最終的に裏切り者で溢れるようになるはずだという理屈である。これは逆の見方をすれば、「現実社会でしばしば見られる協力的行動は、不利で不適応な行動なのに、なぜ存在するのか」という協力的行動の起源に対する問いでもある。では、利他性²はいかに促進・進化するのだろうか。

7. 互惠ルール

2006年にM. A. Nowakは、過去数十年間に報告された多数の協力促進メカニズムが理論的に五つに統合できるとして、有名な五つの互惠ルール (Five reciprocity rules) を示した [17].

7.1 直接互惠: Direct reciprocity

直接互惠は、一言で言えば「AがBを助け、後にBもAを助ける」というような、二つの個体が互いに直接助け合う状態である。この直接互惠は、式(1)の利得行列を以下のように変容させる。

$$\begin{pmatrix} \frac{R}{1-w} & S + \frac{wP}{1-w} \\ T + \frac{wP}{1-w} & \frac{P}{1-w} \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで w は、同じ相手と別ラウンドで出会う確率である。つまり、直接互惠は二個体の間の相互作用が繰り返されることを前提とした互惠ルールである。そして、

² 他者に利益をもたらすことで、自らの適応度や物質的利益が損なわれるにもかかわらず、他者を援助する行為を利他性 (altruism) と呼ぶ。

GID と RAD の強さも式 (6) からそれぞれ下記のように導かれる。

$$D'_{g,rev} = \frac{\{T + wP/(1-w)\} - \{R/(1-w)\}}{\{R/(1-w)\} - \{P/(1-w)\}} \quad (7)$$

$$D'_{r,rev} = \frac{\{P/(1-w)\} - \{S + wP/(1-w)\}}{\{R/(1-w)\} - \{P/(1-w)\}} \quad (8)$$

7.2 間接互惠: Indirect reciprocity

現実の個体間の相互作用は、直接互惠のように同じ相手と何度もゲームするような状況ばかりではない。実際の社会の中では、見知らぬ他者を助けたり、逆に見ず知らずの人に助けられることも多々ある。間接互惠を一言で言えば、「AがBに協力したという情報 (噂, 評判) を知ったCが、後にAに協力する」という状態であり、評判の効果を導入したと考えればわかりやすい。この間接互惠は、式(1)の利得行列を以下のように変容させる。

$$\begin{pmatrix} R & (1-q)S + qP \\ (1-q)T + qP & P \end{pmatrix} \quad (9)$$

ここで q は、相手の評判を知る確率である。そして、GID と RAD の強さも式 (9) からそれぞれ下記のように導かれる。

$$D'_{g,rev} = \frac{\{(1-q)T + qP\} - R}{R - P} \quad (10)$$

$$D'_{r,rev} = \frac{\{(1-q)T + qP\} - \{(1-q)S + qP\}}{R - P} \quad (11)$$

7.3 血縁選択: Kin selection

血縁選択では血縁度の効果を考慮している。血縁度とは、自分と相手が遺伝子を共有している割合であり、簡単な例で言えば、二人兄弟・姉妹が同じ遺伝子を共有する割合は $1/2$ であり、いとこ同士の場合は $1/8$ である。これに注目すれば、自分の子供はもちろん後世に自分の遺伝子を伝えてくれるが、自分の血縁者もまた自分と一部遺伝子を共有しているため、血縁者が子供を残すことも自分にとって利益となる。このような血の繋がりを考慮した血縁選択は、式(1)の利得行列を以下のように変容させる。

$$\begin{pmatrix} R & \frac{S+rT}{1+r} \\ \frac{T+rS}{1+r} & P \end{pmatrix} \quad (12)$$

ここで r は、平均の血縁度である。そして、GID と RAD の強さも式 (12) からそれぞれ下記のように導かれる。

$$D'_{g,rev} = \frac{(T + rS)/(1 + r) - R}{R - P} \quad (13)$$

$$D'_{r,rev} = \frac{P - (S + rT)/(1 + r)}{R - P} \quad (14)$$

7.4 群選択：Group selection

多くの生き物は単一の社会集団の中で暮らしているよりも、さまざまなレベルにおける群（グループ、組織）に属しているといえる。例えば会社に勤務していれば、勤務している会社のレベル、配属している会社の部署のレベルなど、さまざまなレベル（階層）のグループに属している。淘汰はこれらグループに対しても作用するため、グループ間の競争がある状況では、同じグループのメンバーを助ける協力者の多いグループが勝利しやすいかもしれない。このような効果を考慮した群淘汰は、式 (1) の利得行列を以下のように変容させる。

$$\begin{pmatrix} (m+n)R & nS+mR \\ nT+mP & (m+n)P \end{pmatrix} \quad (15)$$

ここで m はグループの数であり、 n は一つのグループにおける最大個体数である。

$$D'_{g,rev} = \frac{(nT+mP) - (m+n)R}{(m+n)R - (m+n)P} \quad (16)$$

$$D'_{r,rev} = \frac{(m+n)P - (nS+mR)}{(m+n)R - (m+n)P} \quad (17)$$

7.5 ネットワーク互恵：Network reciprocity

ネットワーク互恵は、個体間の繋がりにネットワーク構造を導入したものである。現実においては個体間の繋がりが全て均一ということはまず稀であり、実際には頻繁に相互作用する近い人や、一度もやりとりをしたことのない縁遠い人も存在する。このように、繋がりのある他者（隣人）とのみ相互作用すれば、協力的な隣人とだけ付き合う協力的なネットワークの塊（クラスター）も生まれる。このネットワーク互恵は、式 (1) の利得行列を以下のように変容させる。

$$\begin{pmatrix} R & S+H \\ T-H & P \end{pmatrix} \quad (18)$$

ここで H は、

$$H = \frac{(k+1)(R-P) - T+S}{(k+1)(k-2)} \quad (19)$$

であり、 k は平均の隣人の数である。GID と RAD の強さも式 (18) からそれぞれ下記のように導かれる。

$$D'_{g,rev} = \frac{(T-H) - R}{R-P} \quad (20)$$

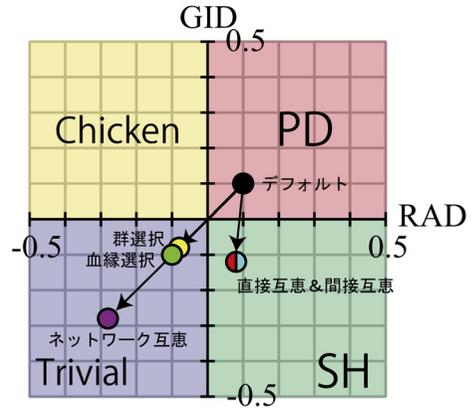


図2 ジレンマ位相面上で描画するジレンマ強度座標の移動 (Ito and Tanimoto [18] より抜粋)
ジレンマ位相面上において、デフォルト (黒丸) の点の座標 ($D'_r = 0.1$, $D'_g = 0.1$) が各互恵ルールによってどの座標に移動するかを示している。直接互恵 (赤丸, $w = 0.2$)、間接互恵 (青丸, $q = 0.2$)、血縁選択 (緑丸, $r = 0.2$)、群選択 (黄丸, $m = 100$, $n = 500$)、ネットワーク互恵 (紫丸, $k = 4$)。

$$D'_{r,rev} = \frac{P - (S + H)}{R - P} \quad (21)$$

8. ジレンマ位相面：Dilemma phase-plane

このように互恵ルールには、利得行列内の要素に作用して社会的ジレンマの強度を変える効果がある。図1と同様に、RAD を横軸に、GID を縦軸に置けば、互恵ルールの導入でゲームのジレンマ座標は (D'_r , D'_g) から ($D'_{r,rev}$, $D'_{g,rev}$) に移動することを意味する。

たとえば、互恵ルールが導入されていないデフォルトの PD ゲームでジレンマの強度 (D'_r , D'_g) がそれぞれ 0.1 の場合を考えてみよう (図2)。直接互恵を $w = 0.2$ で導入した場合、式 (8) と式 (7) に対して、それぞれ式 (5) と式 (4) を代入すれば、(D'_r , D'_g) = (0.1, 0.1) は ($D'_{r,rev}$, $D'_{g,rev}$) = (0.08, -0.12) に移動する。これは RAD と GID の強度が緩和されたというだけでなく、GID が消失してゲーム構造ごとに変化したことを意味している。RAD だけを内包するゲームは SH ゲームであり、ここではゲームが直接互恵によって PD から SH に変容したことを示している。また、直接互恵と間接互恵は同じ座標に点を移動させていることから、同じジレンマ緩和機構をもつことがわかる。ほかのルールは GID だけでなく RAD も大きく緩和している。これにより、最も協力的行動が進化しづらい PD だったゲームを、ジレンマのない状態のゲーム (Trivial) にまで変化させている。このように各互恵ルールは、ゲームのジレンマを緩和し、ゲーム構造を変えることで協力行

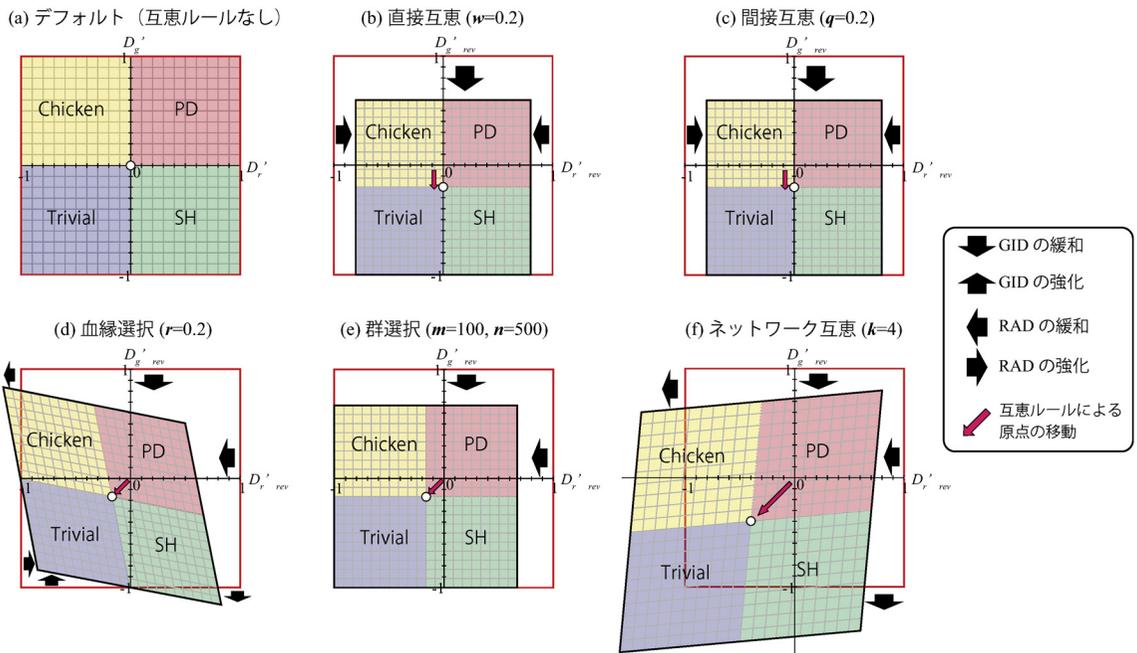


図3 各互惠ルールによるジレンマ緩和機構 (Ito and Tanimoto [18] より)

動を促進していることがわかる。

さらにこの座標移動をより広い範囲 ($-1 \leq D'_r, D'_g \leq 1$) で試してみよう。赤い正方形に囲まれた領域 (右上) の各点 (D'_r, D'_g) (図 3a) は、各互惠ルールによって ($D'_{r,rev}, D'_{g,rev}$) に移動する (図 3b-f)。ここでは、すべての互惠ルールで RAD と GID の正の値が緩和されていることに注目したい。これは二つのジレンマ強度がいずれも緩和されていることを意味しており、さまざまなゲーム構造の変化を起こす (図 4)。

先にも述べたが、直接互惠と間接互惠は同じジレンマ緩和機構をもっている。デフォルトの原点 (白丸) が下方向 (GID の負の方向) に移動するため、Chicken と PD の領域の一部がそれぞれ Trivial と SH に変換されている (図 3b, c, 図 4b, c)。血縁選択、群選択、ネットワーク互惠は原点を RAD と GID の緩和から左下 (RAD と GID の負の方向) に移動させる効果をもつため、さらに多様なゲーム構造の変化を生む (図 4d-f)。血縁選択とネットワーク互惠は平行四辺形のような形にフレームが歪んでいる (図 3d, f)。その際、血縁選択では GID と RAD における負の値の領域でジレンマの強化をもたらしているため、ネットワーク互惠とも異なるジレンマ緩和機構をもつことがわかる。

このように、ジレンマ位相面は利得行列の要素から 1 点の座標を得ることができるため、そのゲームがいかなるゲーム構造をもつのか、そして互惠ルールによ

てどの座標 (ゲーム構造) に移動するのかを視覚的に理解する際に役立つ。

9. おわりに

本稿では Ito and Tanimoto [18] の成果を中心に、ジレンマ強度の計算と、そこから描かれるジレンマ位相面について紹介した。ゲーム理論は数理科学における一大分野であることから、今この瞬間も数多のゲームが '新たなゲーム' として提案されている。しかし、そのゲーム構造が本当に新しいものなのかどうかは、事前に調べておく必要があるだろう。その際、本稿で紹介したジレンマ位相面は、ゲーム構造やジレンマ緩和機構の新規性を確認したりアピールする際にも役立つ。事実、われわれはジレンマ位相面をゲーム構造や協力行動促進機構の新規性を説明する際に活用している [19, 20]。ゲーム理論及び進化ゲームの研究には、是非このジレンマ強度 (RAD と GID) 計測や、ジレンマ位相面を活用していただきたい。

なお本稿では数学的背景を詳述することはせず、あくまでジレンマ強度の可視化の部分だけを取り上げた。互惠ルールに関する説明の部分などでは、秋山 [21] やボウルズとギンタス [22] といった優れた文献を参考とした。またジレンマ強度の導出に関しては、Tanimoto and Sagara [23] から Tanimoto [24] を経て Wang et al. [16] によって一般化された背景をもつ。

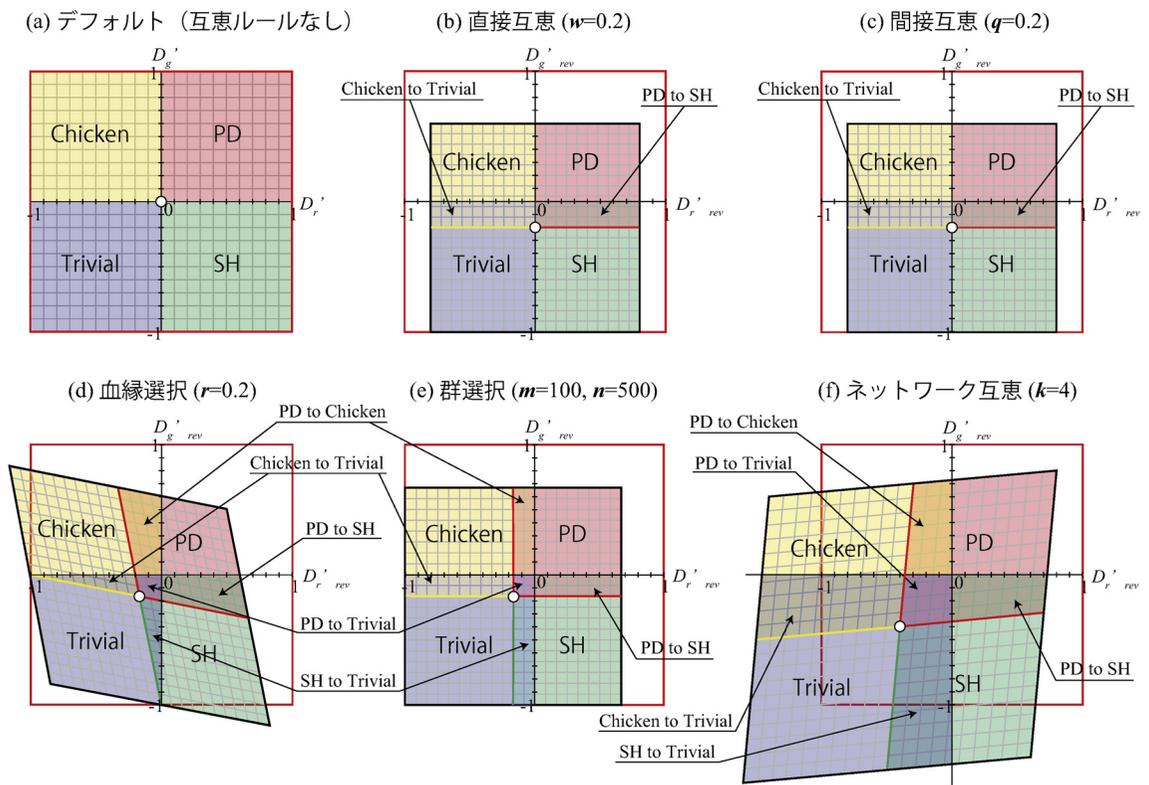


図4 各互惠ルールのジレンマ緩和機構によるゲーム構造の変化領域 (Ito and Tanimoto [18] より)

詳しくはこちらもご覧いただきたい。

謝辞 この特集記事を発表する機会をくださった日本オペレーションズ・リサーチ学会と朝日弓未教授（東京理科大学）に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] J. von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, 1947.
- [2] R. L. Trivers, “The evolution of reciprocal altruism,” *The Quarterly Review of Biology*, **46**, pp. 35–57, 1971.
- [3] R. Axelrod and W. D. Hamilton, “The evolution of cooperation,” *Science*, **211**, pp. 1390–1396, 1981.
- [4] J. Maynard Smith, *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge University Press, 1982.
- [5] J. Maynard Smith, *Evolutionary Genetics*, Oxford University Press, 1998.
- [6] M. A. Nowak, *Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life*, Harvard University Press, 2006.
- [7] J. Tanimoto, *Fundamental of Evolutionary Game Theory and Its Applications*, Springer, 2015.
- [8] A. Rapoport and M. J. Guyer, “A taxonomy of 2×2 games,” *General Systems*, **11**, pp. 203–214, 1966.
- [9] C. Taylor and M. A. Nowak, “Transforming the dilemma,” *Evolution*, **61**, pp. 2281–2292, 2007.
- [10] R. M. Dawes, “Social dilemmas,” *Annual Review of Psychology*, **31**, pp. 169–193, 1980.
- [11] J. Tanimoto, *Evolutionary Games with Socio-physics*, Springer, 2018.
- [12] ヨハン・ギセック (山本太郎訳), 『感染症疫学—感染症の計測・数学モデル・流行の構造—[新版]』, 昭和堂, 2020.
- [13] J. Tanimoto, *Sociophysics Approach to Epidemics*, Springer, 2021.
- [14] G. Hardin, “The tragedy of the commons,” *Science*, **162**, pp. 1243–1248, 1968.
- [15] M. Taylor, *The Possibility of Cooperation: Studies in Rationality and Social Change*, Cambridge University Press, 1987.
- [16] Z. Wang, S. Kokubo, M. Jusup and J. Tanimoto, “Universal scaling for the dilemma strength in evolutionary games,” *Physics of Life Reviews*, **14**, pp. 1–30, 2015.
- [17] M. A. Nowak, “Five rules for the evolution of cooperation,” *Science*, **314**, pp. 1560–1563, 2006.
- [18] H. Ito and J. Tanimoto, “Scaling the phase-plane of social dilemma strength shows game-class changes in the five rules governing the evolution of cooperation,” *Royal Society Open Science*, **5**, 181085, 2018.
- [19] T. Yamamoto, H. Ito, M. Nii, T. Okabe, S. Morita and J. Yoshimura, “A single ‘weight-lifting’ game covers all kinds of games,” *Royal Society Open Science*, **6**, 191602, 2019.
- [20] H. Ito and J. Tanimoto, “Dynamic utility: The sixth reciprocity mechanism for the evolution of cooperation,” *Royal Society Open Science*, **7**, 200891, 2020.
- [21] 秋山英三, “社会集団における協力形成問題へ向けて—

数理モデル, 計算機シミュレーションによるアプローチ,”
組織科学, **51**, pp. 38–48, 2017.

[22] サミュエル・ボウルズ, ハーバート・ギンタス (竹澤正
哲監修, 大槻久・高橋伸幸・稲葉美里・波多野礼佳訳), 『協
力する種—制度と心の共進化—』, NTT 出版, 2017.

[23] J. Tanimoto and H. Sagara, “Relationship between
dilemma occurrence and the existence of a weakly

dominant strategy in a two-player symmetric game,”
Biosystems, **90**, pp. 105–114, 2007.

[24] J. Tanimoto, “A simple scaling of the effectiveness
of supporting mutual cooperation in donor-recipient
games by various reciprocity mechanisms,” *Biosys-
tems*, **96**, pp. 29–34, 2009.