

非参加行動を考慮した協力の進化の研究

Studies on the Evolution of Cooperation with Non-participation

佐々木達矢 指導教員 畝見達夫

SYNOPSIS

In modern societies individuals often have a great deal of freedom and anonymity. This allows individuals to get away with not only free-riding on the efforts of others, but also with opting-out from participating in a cooperative enterprise altogether. While many studies in the biological and the social sciences have contributed to understanding the enduring conundrum of how cooperation can emerge and be maintained in the presence of free-riders, only a handful of studies have studied the role of optional participation. These studies have investigated a classical public goods game where, in addition to cooperation and defection, individuals could opt not to participate in the game altogether. The three discrete strategies considered can lead to evolutionary dynamics similar to a “rock-scissors-paper” cycle known from evolutionary game theory, and thus prevent populations from ending up in mutual defection. However, it is more realistic that the willingness to participate may be an intermediate degree. This thesis proposes a public goods game with probabilistic participation and then shows that the new model can result in all of basic evolutionary scenarios. Also, while the previous model can explain why a significant number of cooperators may be present in populations, it does not explain how the three strategies emerged in the first place. To justify the *a priori* of coexisting pure strategies, this thesis considers a model where individuals are characterized by two continuous trait values representing respectively the cooperative investment and the participation rate in a public goods game. Using adaptive dynamics techniques and an individual-based model, this thesis shows that the co-evolutionary dynamics can lead to trimorphic diversification into the three strategies. In addition, this thesis extends optional participation to conditional participation which is the concept applicable also to the classical compulsory public goods game. The replicator dynamics for the generalized model are fully analysed and conditional participation has turned out to be an effective mechanism for promoting cooperation.

Keywords: cooperation, public goods game, non-participation, replicator dynamics, adaptive dynamics

1 はじめに

協力行動の進化については、生物学だけでなく広く社会科学の分野も含めて、これまで活発に研究がなされてきたテーマの一つである。自然界や人間社会を通じて見られる様々な組織や運動は、個体同士の協力的な相互作用で維持されていることが稀ではない。身近なところでは献血、募金運動、地域自衛組織に始まり、広くは省エネルギー、環境保護運動まで、それらに関わり合いの無い方法を、逆に想定する方が困難なほどである。

しかし、進化論的には、特に何の補助的な機制も無ければ、協力行動が生き残れる余地はない。これまでよく使われてきたモデルの一つとして公共財ゲーム (public goods game) がある。そこで考慮される行動戦略は「協力」「裏切り」という二つである。「協力」者はゲームにおいてある一定の投資額を場に提供し、一方の「裏切り」者は全く投資を行わない。従来よくある定式化では、全「協力」者の投資額は合計され、ある一定の増倍率を乗じることで、ゲーム参加者全体の利益が算出される。次にそれは、「協力」か「裏切り」を問わずゲーム参加者全員で均等に分けられ、そこから当初の投資額を差し引いたものが各個人の利得となる。「裏切り」者は協力投資をしない分、「協力」者より利得は多くなる。個人の利得をその者の適応度と見れば、自然選択下で予想される結果は往々にして全員が「裏切る」状態である。しかし、全員「裏切る」を選んでしまえば全体の利益が最低になるのに対して、全体

の利益を最大化するのは全員「協力」した場合である。この様に個人の利益と集団の利益が対立する状況は、「社会的ジレンマ」、「共有地の悲劇」、または「フリーライダー問題」と呼ばれ人口に膾炙している。

そしてこれまでのところ、血縁関係、ゲームの繰り返し、評判、ネットワーク互恵性、グループ淘汰、懲罰等の機制により、協力行動が維持、促進されることが分かっている。それら従来の研究では相互作用グループの人数を常に一定とする仮定が用いられてきたが、本研究では相互作用グループの人数は可変であるとする、より一般的なモデルに注目する。その様なモデルの中でもシンプルかつ協力維持に効果的なものの一つとして、Hauert et al. [3][4]による参加選択型公共財ゲーム (optional public goods game) がある。彼らは、従来の公共財ゲームで考慮されてきた、協力 (C) と裏切り (D) の二戦略に加えて、ゲームに全く参加しない代わりに安定した利得 σ が補償された“非参加” (N) という第三の戦略を加えた。そして、それら三戦略間で支配的な戦略が、 $\rightarrow C \rightarrow D \rightarrow N \rightarrow C \rightarrow$ と、周期的に入れ替わることにより協力行動が生き残ることが完全に解析された。ただし、長期的に見れば集団の平均利得は、非参加戦略 N の利得 σ を上回りも下回りもしないことも判明した。しかし、環境保護問題のように、誰しも必ず参加せざるを得ない社会的ジレンマというものが少なからず存在する[5]。従って、その様に非参加が原則的に有り得ない状況はこの参加選択型公共財ゲームの射程から外れていると考えられてきた。

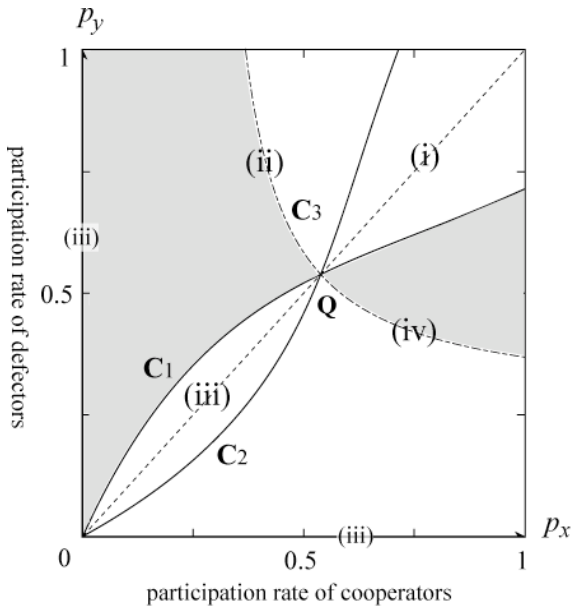


Fig.1. Phase diagram illustrating the different dynamical regimes. The solid curve C_1 and C_2 separate (p_x, p_y) -space into the four regions (i)-(iv) characterized by the different dynamical regimes: (i) dominating defectors, (ii) coexistence, (iii) dominating cooperators, and (iv) bistability, except for $(0,0)$ and Q where the dynamics is neutral. The average payoff at the interior equilibrium is greater than σ in the grey-colored part of (ii) and (iv) bounded by C_3 (the dashed curve), less than σ in the opposite part, and equal to σ on C_3 .

また、 C 、 D 、 N の離散的三戦略は、ゲームへの参加頻度レベルとゲームでの協力的投資レベルからなる二次元の属性空間上で特徴づけられるが、各属性はこれまで両極端の値をとるのみであった。しかし現実的には、許容能力の100%か0%かではなく一部分だけの協力、または常にではなく時々参加、といったような中間的なレベルもあり得る。既存の研究では、 C 、 D 、 N の離散的三戦略をはじめから仮定することについての進化的な説明を欠いている。

そこで本研究では、まず参加頻度レベルを中間的な値とした時のレプリケータダイナミクスおよび平均利得の変化について解析した。戦略は C と N 、 D と N の二種類の混合戦略を仮定した。次に、強制参加型公共財ゲームを射程に入れた、より一般的なモデルを提案し、そのレプリケータダイナミクスを分析した。このモデルは、まずプレイヤーは必ず全員が公共財ゲームを行った後、その最初のゲームでの振る舞いに応じて次の公共財ゲームへの参加、非参加が決定されるという、一種のマルチステージゲームである。そして最後に、二次元の実数値連続属性空間の上での集団戦略分布の進化についてモデルを提案し、そのadaptive dynamicsについて理論的解析および個体ベースシミュレーションによる分析を行った。

2 公共財ゲームへの確率的参加

このモデル[7]ではまず無限母集団を考え、そこから毎回ランダムマッチングにより n 個体を選択し、従来型の n 人公共財ゲームを行うものとする。各個体の持つ戦略として次の二

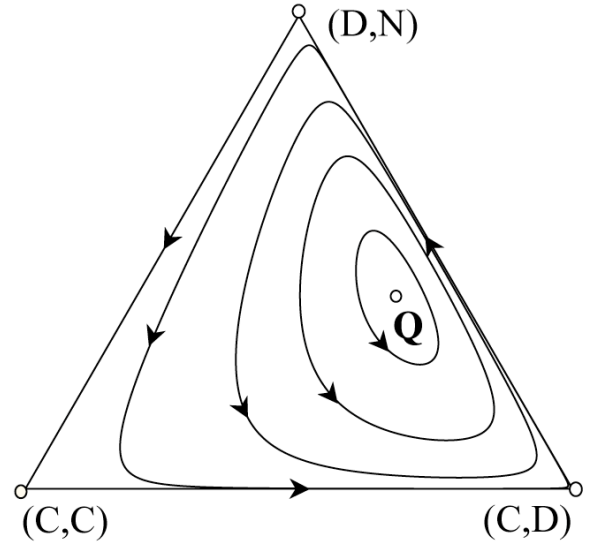


Fig.2. Evolutionary trajectories on the simplex S_3 . Rock-scissors-paper cycles occur. Each corner denotes the homogeneous state with the corresponding strategy. All three corners are saddle points and the boundary of S_3 represents a heteroclinic cycle. In the interior of S_3 a unique fixed point Q appears. This is a centre surrounded by closed orbits.

種類が仮定される。戦略 $C(p_x)$ は確率 p_x で公共財ゲームに参加し協力行動 C を行い、参加しなければ固定利得 σ を得る。一方、戦略 $D(p_y)$ は確率 p_y で公共財ゲームに参加して裏切り D を行い、不参加ならば固定利得 σ を得る。それぞれの戦略の平均利得がレプリケータダイナミクスを計算する際のそれぞれの平均適応度とされる。解析の結果、 $C(p_x)$ と $D(p_y)$ の相対頻度の進化は、パラメータ空間 (p_x, p_y) 上で次の四通りに分類できることが判明した (Fig. 1) :

- (i) $D(p_y)$ が $C(p_x)$ を支配； $D(p_y)$ は大域的安定、
- (ii) 共存；大域安定な内部平衡点が唯一存在、
- (iii) $C(p_x)$ が $D(p_y)$ を支配； $C(p_x)$ は大域的安定、
- (iv) 双安定；唯一存在する不安定内部平衡点が $C(p_x)$ と $D(p_y)$ の吸引域を分割。

以上のような四通りの進化シナリオは二戦略ゲームにおける基本的なものである。従来の研究では2人相互作用モデルによりこれらが説明されてきたが、今回のモデルはより一般的な n 人相互作用モデルであって、四通りの基本進化シナリオ全てを包括するフレームとなっている。

また、内部平衡点における平均利得については、先行研究とは異なり、非参加者の固定利得 σ を上回るケースと下回るケース、共に可能であることが証明された。

3 公共財ゲームへの条件付き参加

先行の参加選択型公共財ゲームは、2ステージゲームの観点から解釈することが出来る。まず最初にゲームに参加する資格があるかどうか、固定参加費用 σ を負担するか否かで決定されると考えれば良い。そして、 σ を払う戦略のプレイヤーは次のステージへ進み公共財ゲームをプレイする。一方、払わない戦略の者は次のステージへ進めない。この最初のステージは、従来の強制参加型公共財ゲームで増倍率を0とし

た特殊ケースに対応させることが出来る。従って、一般的な増倍率のケースに拡張することは自然な流れである[6]。

従って、ここではまず従来の強制参加型公共財ゲームが行われる。そこで投資費用を負担した協力戦略プレイヤーは次の公共財ゲームへ進み、負担しない裏切り戦略プレイヤーは進むことが出来ない。よって、プレイヤーの戦略のタイプは、第一、第二ステージそれぞれに於ける戦略の組み合わせで表され、想定するのは、(C,C)、(C,D)、(D,N)の三通りである。第一ステージの参加者数は常に n 人であるとするが、この第一ステージで D を採る (D,N) プレイヤーの割合に応じて、第二ステージの参加者数は 0 人以上 n 人以下の範囲で変化することとなる。

第一ステージに於ける (D,N) プレイヤーの利得は、第一ステージで C を採るプレイヤーの割合に左右されるが、平均利得の差は常に一定である。レプリケータダイナミクスでは平均適応度（ここでは平均利得）の差と戦略頻度の積が戦略頻度の成長率を決めることから、(C,C)、(C,D)、(D,N) をそれぞれ C 、 D 、 N 戦略に見立てることで、実はこのモデルはレプリケータダイナミクス上では先の参加選択型公共財ゲームと（ほぼ）同等の結果を導くことが分かる。解析の結果、第一ステージに於ける D プレイヤーと C プレイヤーの平均利得の差が、第二ステージが C プレイヤーのみの場合の利得より小さい場合、唯一の内部平衡点 Q が存在し、それを取り巻く閉軌道群が状態空間を埋め尽くすことが証明された(Fig. 2)。

4 協力、裏切り、及び非参加戦略の進化的起源

これまでのモデルでは、予め与えられた有限個の戦略集合に於ける相対頻度の進化が考慮されてきたが、ここでは参加選択型公共財ゲームを拡張し、二次元属性の連続的な進化をも扱えるようにしたモデルを提案、分析する。連続値属性の漸進的進化ダイナミクスについては、近年 adaptive dynamics 理論 (e.g., [2]) による分析が盛んに行われており、従来の一方向的な進化に加え、分裂的な進化ダイナミクス (evolutionary branching) が可能であることが分かってきている。本研究では、adaptive dynamics 理論を用いて、均一属性の集団から進化をはじめたときに、これまで仮定されてきた C 、 D 、 N の三戦略が安定して分化することが出来るための条件を探る。

ここでのモデルにおいて個体の平均適応度は、ゲーム参加時の平均利得と不参加時の利得 σ をそれぞれ参加／不参加確率で重み付けして加えたものから、さらに平均乗り換え費用を差し引いたもので与えられる。ここでの乗り換え費用とは、他の参加者を想定した共同作業から、 σ を得るための単独作業へ（またはその逆方向へ）シフトするときに現実的には発生するであろうタスク変更コストを想定している。このモデルでは、参加／不参加のどちらか一方に偏ったプレイヤーの乗り換え費用は発生せず、二分の一の確率で参加するプレイヤーは平均して最大の費用を払うこととした。

4.1 Evolutionary branching の条件

Adaptive dynamics の理論では、まず均一属性の母集団に対

して希少な変異個体の侵入可能性を定義する。今回のモデルに関しては、 n 人のプレイヤー中 $n-1$ 人が母集団からの個体で残り一人が変異個体とした時のその変異個体の平均適応度が、変異個体がいなかった場合の母集団の平均適応度を上回れば、侵入は成功する。この様にして定義される相対的な平均適応度は侵入適応度 (invasion fitness) と呼ばれ、その勾配ベクトル場を求めることにより、属性空間上の一方向的な進化の流れを知ることが出来る (Fig. 3)。そしてこの勾配ベクトルが消失する点は特異戦略 (singular strategy) と呼ばれ、集団がもしこの点に収束した場合、その後の進化動態を知るためには次に侵入適応度の高次の項を知る必要がある。属性空間が一次元の場合には特異戦略の一般的な分類が得られている。特に、特異戦略が(局所的)アトラクターの場合 (convergence stable singular strategy)、次の二つの進化シナリオが考えられる。一つは特異戦略において侵入適応度が極大である場合で、このとき特異戦略に収束した集団にはそれ以上の進化は無い。このケースは evolutionarily stable strategy (ESS) と呼ばれる。しかし、特異戦略で侵入適応度が極小の場合、特異戦略を挟んで両側からの変異個体の侵入が可能となる。一次元の場合には最終的に特異戦略上の均一集団は(局所的には)次第に離れ行く二つの共存クラスターによって置き換えられる。これが evolutionary branching と呼ばれるケースである。一方、属性空間が二次元以上の場合にはまだ一般的な分類は得られていない。

本研究では、evolutionary branching を得るために、Doebeli et al. [1]等の先行研究を鑑み、ゲーム参加者の平均協力投資額に対して、従来の public goods game のように線形ではなく、二次の利得関数を採用した。また参加確率に対しても二次の乗り換え費用関数を採用した。理論的解析の結果、乗り換えコストが無い場合に、内部特異戦略が唯一存在すること、および、特異戦略がアトラクターとなるための必要十分条件、そして、乗り換えコストが十分小さい場合に、特異戦略が evolutionary branching であるための十分条件、が示された。

4.2 個体ベースシミュレーション：三戦略の創発

本研究では上記の evolutionary branching 後に引き続いて起る進化シナリオを分析するために、個体ベースシミュレーションを用いた。その結果、内部特異戦略における分岐で発生した二つのクラスターは、互いに離れて行き双方とも属性空間の境界まで到達した。その後、一方のクラスターにおいて第二の evolutionary branching が境界に沿って発生することが観察された。その結果、最終的には三つの互いに共存するクラスターが、二次元属性空間上で各 C 、 D 、 N 戦略に対応する位置をそれぞれ占めるに至った (Fig. 4)。

5 結論

本研究では、社会的ジレンマ状況における協調行動の進化の研究として、先行の参加選択型公共財ゲームモデルをベースに、より一般的、包括的なモデルの提案、分析を行い、相互作用グループサイズ可変性が協力行動の進化にもたらす豊

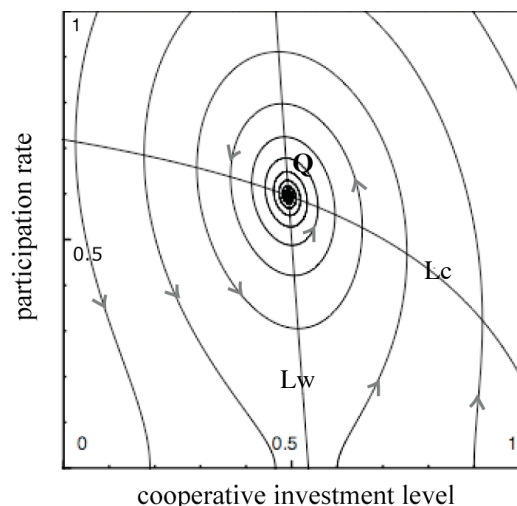


Fig.3. Selection gradient with convergence stable singular strategy **Q**. The solid curves **Lc** and **Lw** denote interior isoclines where there is no selection pressure along the cooperative investment level and the participation rate, respectively.

かな可能性を明らかにした。

まず、中間的な参加確率を従来の **C** と **D** 戦略に持たせることで得られた二戦略モデルは、基本的な進化シナリオを全て包括するフレームワークであることが明らかにされた。従来の社会的ジレンマ研究においては、囚人のジレンマやチキンゲームといったそれぞれのシナリオ毎に独立して協調を促進する機制が様々調べられてきたが、今後、このフレームをもとにして統一的な知見を得ることも期待できる。

次に提案された、条件付き参加型繰り返し公共財ゲームの解析においては、古典的な強制参加型公共財ゲームに続き、参加条件のある公共財ゲームを新たに接続することで、どちらにおいても協力する (**C**, **C**) 戦略が動的な平衡状態のもと生き残ることが証明された。このモデルでは、最初の全員参加ステージで裏切ったプレイヤーは次のステージへの参加資格を失う。裏切り戦略の排除は一種の懲罰とも見なせる。実際に、規範から逸脱した者を排除する、いわゆるオストラシズムは、社会を維持するために古くからある懲罰の手法である。条件付き参加型繰り返し公共財ゲームは、協力の進化における排除の機制の有効性に対して、新しい光を投げかけている。

最後に、先行研究における協力行動と参加行動の属性を二つ共に実数値可変なものへと拡張し、二次元属性空間上の漸進的進化を **adaptive dynamics** の手法から分析した。結果として、均一な属性を持つ母集団から、**evolutionary branching** を通じて、従来ではアプリオリに仮定されてきた **C**、**D**、**N** の三戦略が分化、創発できることが示された。

協力の進化の研究で注目を集めてきた、ゲームの繰り返し、評判、懲罰等の補助機制は、相手の識別や経歴の記憶といった比較的高度な認知能力を個体に要求するため、一般 **n** 人グループへ応用する際の敷居は高かった。それらに対し、本研

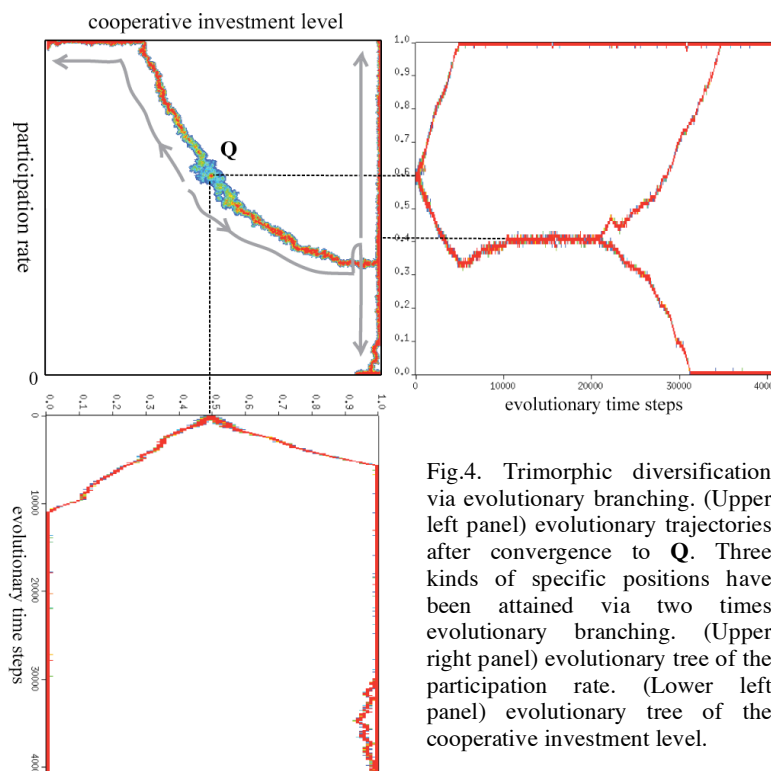


Fig.4. Trimorphic diversification via evolutionary branching. (Upper left panel) evolutionary trajectories after convergence to **Q**. Three kinds of specific positions have been attained via two times evolutionary branching. (Upper right panel) evolutionary tree of the participation rate. (Lower left panel) evolutionary tree of the cooperative investment level.

究で扱った相互作用グループサイズ可変モデルは基本的に匿名状況においても可能なシンプルな機制を前提にしており、今後、人間から細胞レベルの相互作用に至るまで幅広い適用が期待できる。

参考文献

- [1] Doebeli, M., Hauert, C. and Killingback, T. (2004) The evolutionary origin of cooperators and defectors. *Science* 306, 859-862
- [2] Geritz, S.A.H., Kisdi, É., Meszéna, G. and Metz, J.A.J. (1998) Evolutionarily singular strategies and the adaptive growth and branching of the evolutionary tree. *Evolutionary Ecology* 12, 35-57
- [3] Hauert, C., De Monte, S., Hofbauer, J. and Sigmund, K. (2002a). Replicator dynamics for optional public goods games. *Journal of Theoretical Biology* 218, 187-194.
- [4] Hauert, C., De Monte, S., Hofbauer, J. and Sigmund, K. (2002b) Volunteering as red queen mechanism for cooperation in public goods games. *Science* 296, 1129-1132.
- [5] Hauert, C., Traulsen, A., Brandt, H., Nowak, M.A. and Sigmund, K. (2007) Via freedom to coercion: The emergence of costly punishment. *Science* 316, 1905-1907.
- [6] Sasaki, T. and Unemi, T. (2009) Another social dilemma can promote cooperation (submitted)
- [7] Sasaki, T., Okada, I. and Unemi, T. (2007) Probabilistic participation in public goods games. *Proc. R. Soc. B.* 274, 2639-2642