

頑固さの進化  
Evolution of stubbornness

黒川 瞬

京都大学大学院・農学研究科

中国科学院動物研究所

Shun Kurokawa

Graduate School of Agriculture, Kyoto University

Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences

**Abstract:** 協利行動の存在は説明を要する。繰り返し相互作用において、「相手が協利すれば協利する。相手が協利しなければ協利しない。」という行動をとった場合、協利行動は進化しえ、これは直接互惠性と呼ばれる主要なメカニズムである。直接互惠性は、相手の（過去の）行動に関する情報が使えることを前提としているが、相手の行動に関する情報はしばしば不完全である。そして、相手の行動に関する情報がない場合の選択肢として、種々考えられるが、ここでは、(i)相手の行動に関する情報がない場合は、ある決まった確率で協利をする。(ii)相手の行動に関する情報がない場合は、自分の過去の行動を参照する。という2つの選択肢を考える。(ii)の選択肢は、(i)の選択肢よりも、有利になりえるのだろうか？すなわち、自分の過去の行動は、進化する上で有益な情報なのだろうか？今回、私は、繰り返し囚人のジレンマにおける、条件付協利者と無条件非協利者のゲームを考える。そして、ALLDの侵入に対する安定性を調べたESS解析の結果、(ii)の選択肢の中でも、とりわけ、相手の行動に関する情報がない場合は、自分の過去の行動を踏まえて、「自分が前回の相互作用において協利していれば協利する、非協利していれば非協利する」という頑固な行動をとった場合、(i)の選択肢よりも、ESSになるための条件は緩い、すなわち、進化しやすいことを発見する。この結果は、自分の過去の行動は、進化する上で有益な情報であることを意味するが、報復的な行動を個体がとる場合、頑固な行動は一種の報復的な行動である、とみなせることから解釈できる。

## 1. Introduction

自然選択の結果である、という観点から考えると、身の回りで観察される協力行動の存在は説明を要する[1,2]。無条件に他者に対して協力をする行動は、非協力者に搾取され、自然選択の結果、淘汰されてしまうことが期待される一方で、同一個体と繰り返し相互作用し、相手の過去の行動に応じて、協力するか非協力するかを変化させる条件付協力行動は、進化しうる。直接互惠性は、繰り返し相互作用において、「相手が協力すれば協力する。相手が協力しなければ協力しない。」という行動であり、協力行動の進化を説明する主要なメカニズムであり続けてきた[3]。

直接互惠性は、相手の過去の行動に関する情報が使えることを前提としているが、相手の行動に関する情報はしばしば不完全である[4-8]。そして、相互作用する相手の行動に関する情報がない場合は、相手の行動をまねることはもちろんできない。相手の行動に関する情報がない場合の代替手段として、種々考えられるが、ここでは、以下の2つを考える。すなわち、(i)相手の行動に関する情報がない場合は、ある決まった確率で協力をする、(ii)相手の行動に関する情報がない場合は、自分の過去の行動を参照する、という2つの選択肢である。(ii)の選択肢は、(i)の選択肢よりも、有利になりえるのだろうか？つまり、自分の過去の行動は、進化する上で有益な情報なのだろうか？

今回、私は、繰り返し囚人のジレンマにおける、条件付協力者と無条件非協力者のゲームを考え、無条件非協力者の侵入に対する安定性を調べる ESS 解析を行うことにより、この問いに対して解答を与えるを試みる。

## 2. Model

個体がランダムに対戦相手を選び、2個体間で繰り返し囚人のジレンマゲームが行われる状況を考える。個体は、協力か非協力かのいずれかを各ラウンドで選び、次回ラウンドに進む確率は、 $\delta$ とおく（確率 $1 - \delta$ で、対戦はそのラウンドで終了する）。協力すると、相手個体に、ベネフィット $B$ が与えられる一方で、コスト $C$ をおう。

情報はしばしば不完全であることが指摘されているが[4-8]、個体の行動に関する情報（すなわち、その個体が協力したかどうか）が、相手個体に伝わらない確率を、 $e$ とおく。確率 $1 - e$ で、協力したか否かが相手に伝わる。

戦略は、先行研究[5,9]を参考にし、以下の2つを考える。1つは、相手の行動に関わらず、常に非協力する戦略で、ALLD と以下では呼ぶことにする。もう一つは、条件付協力者である。3-1 セクションでは、条件付協力者として、初回は確率1で協力をする意図があり、続くラウンドでは、相手が前回ラウンドで協力していたら、確率1で協力する意図があり、相手が前回ラウンドで非協力

していたら、確率1で非協力をし、相手の前回ラウンドでの行動に関する情報が  
ない場合は、確率 $a$ で協力をする意図がある戦略を考える[5]。この戦略を、以下  
では R1 とよぶことにする。一方で、3-2 セクションでは、条件付協力者として、  
初回は確率1で協力をする意図があり、続くラウンドでは、相手が前回ラウンド  
で協力していたら、確率1で協力する意図があり、相手が前回ラウンドで非協力  
していたら、確率1で非協力をし、相手の前回ラウンドでの行動に関する情報が  
なく、自分が前回ラウンドで協力をしていた場合は、確率 $a$ で協力をする意図が  
あり、相手の前回ラウンドでの行動に関する情報がなく、自分が前回ラウンド  
で非協力をしていた場合は、確率 $b$ で協力をする意図がある戦略を考える。この  
戦略を、以下では R2 とよぶことにする。R2 は R1 の一般化であり、 $b = a$ の場  
合、R2 は R1 に帰着する。また、 $a > b$ の場合、R2 は頑固さを有していると言  
え、R1 は頑固さを持たない戦略であると言えよう。協力する意図がある場合で  
あっても、確率 $\mu$ で協力をすることに失敗する、と仮定する[10]。

### 3. Result

#### 3-1. Result 1

このサブセクションでは、R1 戦略が ALLD の侵入に対して ESS であるための条  
件を調べる。R1 戦略が ALLD の侵入に対して ESS であるための条件は代数的解  
析の結果、

$$\frac{c}{B} < \delta(1-e)(1-\mu) \quad (1)$$

であることがわかる。この式は $a$ を含まず、これは、 $a$ が進化のしやすさに影響  
を与えないことを意味する[5]。

#### 3-2. Result 2

このサブセクションでは、R2 戦略が ALLD の侵入に対して ESS であるための条  
件を調べる。R2 戦略が ALLD の侵入に対して ESS であるための条件は代数的解  
析の結果、

$$\frac{c}{B} < \frac{\delta(1-e)(1-\mu)}{1-e\delta(a-b)(1-\mu)} \quad (2)$$

であることがわかる。 $b = a$ を(2)に代入すると、(1)に帰着する。また、 $a > b$ の  
場合、(2)の右辺は、(1)の右辺よりも大きくなる。これは、頑固さをもった戦略  
のほうが、頑固さを持たない戦略よりも、進化しやすいことを意味する。

#### 4. Discussion

本講究録では、相手の行動に関する情報がしばしばない状況を考え、自分の前回の行動を参照する頑固な戦略と、自分の行動に関する情報を行動決定に用いない頑固さを持たない戦略を考え、頑固さが協利行動の進化を促進することを明らかにした。

なぜ、このような結果が得られたのであろうか？(2)は以下のようにも記述できる。

$$-C + B \sum_{t=1}^{\infty} (1-e)(1-\mu)(e(a-b)(1-\mu))^{t-1} \delta^t > 0 \quad (3)$$

これは、相手の行動に関する情報がない状況下では自分の手を参照する場合、協利をすることが、1ラウンド後の相手の協利のみならず、2ラウンド後以降の相手の協利のみを引き出すことを意味する。そしてこれは、報復性を持つ場合は自分の行動は相手の行動を反映していることから、頑固さを有し自分の行動をまねることは、結果的に相手の行動をまねることにつながることから解釈可能である。

なお、頑固さがある場合は、自分の行動を前回から変更する際にかかるスイッチングコスト[11]がかからないことが想定されるため、スイッチングコストを考慮すると、頑固さを伴った戦略はより一層進化しやすくなると考えられる。この意味で、本モデルの結果は保守的である。

## References

1. Hamilton, W. D. (1964). The genetical evolution of social behaviour I, II. *Journal of Theoretical Biology*, 7, 1–52. (doi:10.1016/0022-5193(64)90038-4) (doi: 10.1016/0022-5193(64)90039-6)
2. Maynard Smith, J. (1982). *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge University Press, Cambridge.
3. Trivers, R. (1971). The evolution of reciprocal altruism. *The Quarterly Review of Biology*, 46, 35–57. (doi: 10.1086/406755)
4. Bowles, S., & Gintis, H. (2011). *A cooperative species: Human reciprocity and its evolution*. Princeton, NJ: Princeton University Press. (doi: 10.1515/9781400838837)
5. Kurokawa, S. (2016). Does imperfect information always disturb the evolution of reciprocity? *Letters on Evolutionary Behavioral Science*, 7, 14–16. (doi: 10.5178/lebs.2016.43)
6. Kurokawa, S. (2016). Imperfect information facilitates the evolution of reciprocity. *Mathematical Biosciences*, 276, 114–120. (doi: 10.1016/j.mbs.2016.03.011)
7. Kurokawa, S. (2016). Evolutionary stagnation of reciprocators. *Animal Behaviour*, 122, 217–225. (doi: 10.1016/j.anbehav.2016.09.014)
8. Kurokawa, S. (2016). Unified and simple understanding for the evolution of conditional cooperators. *Mathematical Biosciences*, 282, 16–20. (doi: 10.1016/j.mbs.2016.09.012)
9. Axelrod, R., & Hamilton, W. D. (1981). The evolution of cooperation. *Science*, 211, 1390–1396. (doi: 10.1126/science.7466396)
10. May, R. M. (1987). More evolution of cooperation. *Nature*, 327, 15–17. (doi: 10.1038/327015a0)
11. Lipman, B. L., & Wang, R. (2000). Switching costs in frequently repeated games. *Journal of Economic Theory*, 93, 149–190. (doi: 10.1006/jeth.2000.2655)