

The Further Evolution of Cooperation

R. Axelrod and D. Dion

Science Vol. 242 pp.1385-1390 (1988)

1 導入

- 協調は社会科学や生物学の分野において未だに関心のあるトピックである
 - 互恵主義に基づく協調の理論は協調の進化 (the evolution of cooperation) についての多くの研究を生み出してきた
- これまでに互恵主義に基づく協調に関する実験研究が数多く行われ、それを支持する結果を示している
 - 戦争時の軍事衝突に関する研究 (Huth, *in press*)
 - コウモリ (Wilkinson, 1984, 1985), サル (Seyfarth and Cheney, 1984), 無脊椎動物 (Buss, 1981) も互恵的な協調を行うという研究
 - 契約違反 (Katz, 1987), 子供の保護 (Schepard, 1985), 貿易 (Dixit, 1987; Goldstein and Krasner, 1984) の問題についての研究
- 我々は Axelrod が立てた理論 (Axelrod, 1984) を基に、協調の進化に関する最近の研究を分析していく
 - 裏切り行為が報われる環境において、協調を選ぶ理由があるのか?
 - * 囚人のジレンマゲームを用いて、この疑問に答える

2 囚人のジレンマゲーム

| | | Player B | |
|----------|------------------|--|--|
| | | C Cooperation | D Defection |
| Player A | C Cooperation | $R=3$ Reward for mutual cooperation | $S=0$ Sucker's payoff |
| | D Defection | $T=5$ Temptation to defect | $P=1$ Punishment for mutual defection |

Fig. 1. The Prisoner's Dilemma game. The payoff to player A is shown with illustrative numerical values. The game is defined by $T > R > P > S$ and $R > (S + T)/2$.

- Fig.1 は囚人のジレンマゲームの際に使う利得表の例である
- 囚人のジレンマゲームの概要

- プレイヤーは「協調」か「裏切り」のどちらかを選択する
- 相手の選択に関わらず、「裏切り」を選択する方が得である
- しかし、両者が「裏切り」を選択すると、「お互い協調」の場合と比べて、もらえる得点が低い
 - * これらの理由でジレンマが生じる
- 1度きりの囚人のジレンマゲームは「裏切り」を選ぶのが最善
 - しかし、繰り返し行う場合は「協調」を選択する余地が多分に存在する
- どの方略が効果的な方略かを調べるために、以下の条件を設定して、囚人のジレンマゲームをプレーするコンピュータプログラムを募集して、トーナメントを行った (Axelrod, 1984)
 1. 1対1の対戦
 2. 選択肢は2つ（「協調」か「裏切り」）で、同時に出す
 3. 利得表は Fig.1
 4. 行動を決定する際、過去の行動履歴を参照してもよい。また、ノイズはない
- このトーナメントで優勝した方略は TFT(しっぺ返し方略)であった
 - TFT(しっぺ返し方略)：最初は協調を選択し、次回から前回の相手の選択肢を出す方略
- 次に行った2回目のトーナメントでは以下の条件を付け加えて、プログラムを募集した
 - ある一定の確率(未来係数 w)でゲームが終了
 - * 前回のトーナメントではゲームの試行数を200試行としていたが、この条件が加わることで何試行でゲームが終了するか不明瞭となる
- 62方略の応募があった2回目のトーナメントに優勝した方略はまたしても TFT だった
 - TFT が成功した理由は以下の特性を持っているから
 1. nice：相手よりも先に裏切らない
 2. provokable：相手の裏切りに対して裏切りで応じる
 3. forgiving：相手の裏切りを引きずらない
 4. clear：相手に分かりやすい
 - * 応募方略によっては、相手が TFT であるのかを識別し、その結果によって行動を変えるものがあつた
- しかし、これらのトーナメントに優勝したからと言って、TFT が進化論的に優れた方略とは言えない
 - TFT の成功は永い間生存できない方略とのインタラクションの結果かもしれないから
 - * すなわち、すぐに滅んでしまうような方略との対戦によって、利得を稼いだかもしれない
- よって、生態学的シミュレーションを実施した
 - 2回目のトーナメントに出場した62方略を用い、以下のルールで行った
 - * 前回のラウンドで獲得した利得に応じて、次の世代に生き残る方略の数を決定する

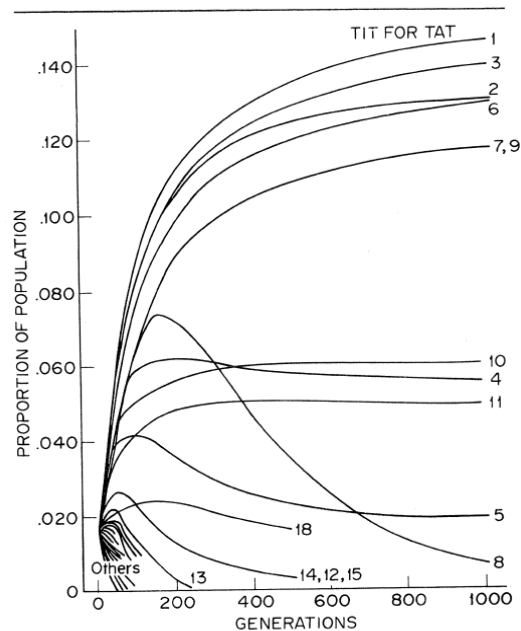


Figure 1: Simulated Ecological Success of the Decision Rules

- シミュレーションの結果 (上の Fig.1, Axelrod(1980) より抜粋), TFT が最も繁栄することが分かった
 - 一旦互恵的な協調を取る方略が幅を利かせると, 未来係数 w が十分に高い場合はどの方略も協調することが最善となる
 - * 未来係数 w : 次の試行でゲームが終了してしまう確率
 - * 言い換えると, 今後相手とインタラクションする可能性
- 以上のような Axelrod が行った研究から派生した多くの研究を 7 つの事項に沿って見ていく

3 Interactions

- 囚人のジレンマゲームのプレイヤーは基本 2 人だが, 2 人以上に拡張したゲーム (n -player PD, NPD) を扱った研究も多い
- NPD の研究において, プレイヤーが増えれば増えるほど協調することが難しくなると言われている
 - 進化論的な枠組みを用いていない Taylor(1976)
 - * プレイヤー n 人に対し, ALL D(全て裏切る方略) が複数いる時, 「未来係数 w が高い」か「協調的なプレイヤーが十分いる」を満たさないと協調が不利となることが分かった
 - 進化論的な枠組みを用いた Joshi(1987)
 - * 「hardTFT(一人のプレイヤーが裏切るまで協調する方略)」がある割合が存在すれば, ALL D の集団を支配することが出来るが, プレイヤーの数 (n) を増やすと「hardTFT」の割合も高くする必要があることが分かった

4 Choices

- 囚人のジレンマゲームには2人のプレイヤーが同時に「2つの選択肢（「協調」か「裏切り」）から1つの選択」をするという基本的なルールがある
- このルールに「ゲームから抜け出す」又は「相手をゲームから退場させる」という選択肢を取り入れた研究がある
 - － 「ゲームから抜け出す」選択肢がある場合、協調を好む参加者は相手に裏切られる前にゲームを抜け出すと考えられるが、9人制囚人のジレンマゲームにおいては、誰も途中でゲームを抜け出さなかった (Orbell,1984)
 - * 理由は協調を好む参加者はグループのために協調を促そうとするためである
 - － 「相手をゲームから退場させる」選択肢があることで、最後まで安定した協調が生まれた研究もある (Hirshleifer and Rasmusen,1988)
 - * この結果を支持する実験研究として、学校でのいじめっ子を追放するという働きかけがいじめの減少に繋がった研究がある (Barner-Barry,1986)

5 Payoffs

| プレイヤーB プレイヤーA | 協調 | 裏切り |
|------------------|-------------|-------------|
| 協調 | A: 2 , B: 2 | A: 1 , B: 3 |
| 裏切り | A: 3 , B: 1 | A: 0 , B: 0 |

- 利得表の違いが与える影響は？
 - － 囚人のジレンマが生じる利得表とチキンゲームの利得表 (参考：上の表) の両方についてコンピュータトーナメントを行った研究 (Dancey and Pendegraft, *in press*)
 - * 囚人のジレンマが生じる利得表では TFT のパフォーマンスが高かった
 - * しかし、チキンゲームの利得表では「PERMANENT RETALIATION(相手が裏切るまで協調し、相手に裏切られたらその後ずっと裏切る方略)」が一番優れた方略であった

6 Noise

- 誤った情報を伝達してしまう(ノイズ)状況は互恵的な方略の有効性を阻害してしまう
 - － ある程度のノイズがある状況では、TFT 同士の対戦で獲得できる利得は RANDOM 同士の対戦のものと同じとなる (Molander,1985)
 - * ノイズがある状況では TFT よりも相手の裏切りに鈍感な TFT(例えば TF2T = 2 試行連続で裏切られたら裏切る方略)の方が有効である
 - － ノイズが生じる状況が稀にしか起きないのならば、この TFT の弱点は重要ではない
 - * しかし、人間の記憶や認識力に限界があることを考えれば、相手の情報を誤って解釈したり、逆に相手に誤って解釈される可能性は免れない

- * 実際にノイズが原因で人同士や国同士で深刻な問題となった例が報告されている (Gowa,1986; Brown,1986)
- ノイズが生じる状況下でのトーナメントを行った2つの研究
 - * ノイズが1%で生じるトーナメント (Axelrod,1984) : TFT が最も有効な方略
 - * ノイズが10%で生じるトーナメント (Donninger,1986) : TFT は21方略中6位
- ノイズがある状況で TFT が上手く振舞うためにはどのように改変すれば良いか？
 - その方法はノイズの種類によって異なる
 1. misimplementation(誤った実行) : 意図した選択と違う方を選択してしまう
 2. misperception(誤った認識) : 実際にした選択を相手が逆の方の選択だと認識してしまう
 - misimplementation
 - * 自分は自分の間違いに気付くが、相手は自分の間違いを判別できない
 - * この場合、自分の間違いを自覚出来るため、修正が容易である
 - ・ 間違っ「裏切り」を選択した後、「協調」を選択する確率を高めれば misimplementation のノイズに対応できる (Sugden, *in press*)
 - misperception
 - * 自分は相手が間違っ認識したか分からないし、相手も自分の間違いを判別できない
 - ・ そのため、ノイズの無い囚人のジレンマゲームと違いがない
 - * しかし、お互いが misperception が生じることを分かっていたら対処できる (Molander,1985; Mueller,1987)
 - ・ 相手の裏切りに対して、協調を選択するという「寛大さ」を取り入れることで、ノイズによる協調の抑制を回避できる
- ノイズが少ない状況での囚人のジレンマゲームについて考えることで「寛大さ」が有効に働くことが分かった
 - しかし、ノイズが高確率で起こる状況ではトレードオフが生じる
 - * トレードオフ : 「不必要な衝突を避けるための寛大さ」 「寛大さによる相手からの搾取」

7 The Shadow of the Future

- ゲームの終了試行数を不定にするために、次の試行で終了する確率を「未来係数 w 」とする
 - 未来係数 w : 未来の不透明さ (the shadow of the future) と呼ばれ、 $w \leq \max[(T-R)/(R-S), (T-R)/(T-P)]$ の時に協調のメリットがある (Axelrod,1984)
- もし、協調の効果が未来係数 w に依存しているならば、プレイヤーの協調選択率に変化があるのは当然である
 - そのため、ここでは有限囚人のジレンマゲーム (試行数があらかじめ決められているゲーム) について取り上げる
- 有限囚人のジレンマゲーム (finitely repeated prisoner's dilemma, FRPD)
 - FRPD のようにあらかじめ試行数が決まっている場合、後ろ向き帰納法により、協調は理に適った選択ではない

- * 後ろ向き帰納法：最後の試行 (n 試行目) は裏切った方が得, それならば $n-1$ 試行目も裏切った方が得, 同様に $n-2$ 試行目も...
- この理由により Axelrod が行った 2 回目のトーナメントでは未来係数 w を用いて, FRPD としなかった

8 Population Dynamics

- 進化論的に安定した方略 (evolutionarily stable strategy, ESS) とナッシュ均衡¹により安定した方略の違い
 - プレイヤー X がプレイヤー Y と対戦している時の X の利得を $V(X|Y)$ とすると
 - * ESS: $V(X|X) > V(Y|X)$ or $V(X|X) = V(Y|X)$ and $V(X|Y) > V(Y|Y)$ が成立することが条件
 - * ナッシュ均衡により安定した方略: $V(Y|X) > V(X|X)$ を満たす方略がいなければ成立
 - すなわち, 前者は敵の侵入を許さない方略であるが, 後者は敵の侵入を許してしまう方略である (Hines, 1987)
- 囚人のジレンマゲームにおいて, 敵の侵入を許してしまう方略がある時, ESS は決まらない
 - インタラクションの機会が豊富にある場合 (未来係数 w が十分高い場合), 方略 X にとって ESS の条件を満たさない方略 Z が必ず存在してしまう (Pudait, 1985)

9 Population Structure

- 協調の進化は協調的な方略が少数でもいれば, 非協調的な集団の中でさえも起こる (Axelrod, 1984)
 - では, 協調は最初の人口構造によらず, 進化することは出来ないのか?
- 未来係数 w が十分大きい時, ESS は存在しないため, もし協調をし合えるペアがいれば, 人口構造によらずに協調は進化する (Pudait, 1985; Boyd and Lorberbaum, 1987)
 - Boyd and Lorberbaum は人口構成を「TFT」, 「STFT (初めは裏切り, 後は相手の前回の手を出す)」, 「TF2T (2 回裏切られたら裏切り返す)」の 3 方略の場合を考えた
 - * STFT vs. TF2T: 最初を除き, 全て協調
 - * STFT vs. TFT: 協調と裏切りを行動に選択する
 - * TFT vs. TF2T: 全て協調
 - 最も協調的な方略である TF2T が TFT と STFT よりも繁栄でき, TF2T の集団がなくても, 協調が進化する

¹相手がある方略 (選択) を取る時, 自分だけが方略 (選択) を変更しても自分の利得が増加しない状態. 囚人のジレンマゲームにおいてのナッシュ均衡は「お互い裏切り」の状態である.

10 Conclusion

- Axelrod の発見 (Axelrod,1984) がオリジナルである 2 人制繰り返し囚人のジレンマゲームとは異なる設定を施した研究を生み出した
 - n 人制のゲームでは協調することが困難であることが示された
 - 「ゲームから抜け出す」選択や「相手をゲームから追い出す」選択を加えた状況においては Axelrod の結論と反する結果にはならなかった
 - ノイズが生じる状況については、ノイズが少ない場合には「寛大さ」の有効性が示された。しかし、ノイズが大きい場合はその「寛大さ」が逆に搾取される原因となってしまうことが示された
 - 互恵的行動の重要性と不明瞭な未来によって得られた結果は囚人のジレンマゲームの枠を超え、適切な行動を導く知見を与えてくれた
 - 協調は人口構造によらず、進化する可能性も示唆された
- 協調の進化を追究するためにはより詳細なインタラクションのパターンとインタラクションが進化する過程を必要とする
- 今回の試みは理論的な研究と実験研究を結びつけるだけでなく、さらなる協調の進化における理解に繋がった