

環境問題におけるフリーライダーを排除するマイノリティについて

——互惠主義が集会的進化安定になるためのゲーム理論的解析——

岡 田 勇

1 はじめに

本稿は、現状の環境問題における重要なテーマである個人の態度変容に関する数理的な分析を行う。ミクロ経済学的な合理性を有する個人が、環境問題の解決のために、一見するとコストの高い行動をとらねばならないことに対する心理的抵抗を緩和するための諸条件について、ゲーム理論の枠組みを用いて数理的に解析することで、公理的な解釈を行う。そのため、本稿の知見は、基礎的な人間理解に基づいて、環境問題解決に対する新たな視点を提供するものとする。

現在において、「環境問題」という一連の啓蒙活動は、人類の基本的な態度に結びついたという意味で、ある段階を終了したとあっていいだろう。しかし野波（2001）によると、環境問題においては、個人の態度に関して目標認知と行動認知に乖離があることが指摘されている。すなわち、誰も環境問題の解決のために何かしなければならないという目標については共有されているといえるが、それが直ちに日常の行動パターンの変化に結びつき、具体的な行動変革を促すまでは達していないというのである。しかしながら、環境問題は構成員の行動変化が重要な解決要素になっていることは論を俟たない。すなわち、フリーライダー問題（Olson, 1965）がそれである¹⁾。

この点を分かりやすく例示したモデルに、Hardin（1968）の「共有地の悲劇（tragedy of the commons）」がある。概要は次の通り。複数の羊飼いが共同所有している牧草地（共有地）があると、個々の羊飼いは飼育する羊の数を自由に決めることができるとする。しかし、共有地の草の量は有限であるため、全体としての羊の飼育可能量には限界がある。もし、羊飼いがある種の合理性を有していると、彼らは多くの利益を得るために、自分が飼育する羊を増やそうとする。なぜなら、羊一頭を増やすことによる自分の利益の増加分に比べて、増やしたことによる牧草の損失分は、羊飼いが全員が均等負担するので、一般的に小さいからである。これは、飼育可能量を超えても羊は増え続けることを意味するので、全ての羊は餓死に追い込まれる。このモデルの本

1) フリーライダー問題は規範の形成を促すという一連の研究がある。人類が獲得した規範としての共同分配規範（竹澤他, 2002）や2次のフリーライダー（Yamagishi, 1986）を排除するメタ規範の創発（Axelrod, 1986）などである。これらは規範という社会的文脈を考慮する立場であるが、本稿では、社会的文脈ではなく、集会的文脈のみに依存する枠組みで考察する。

質は、全員が自由に搾取可能な、全体としては有限な資源があり、しかも、資源の負担は全員にほぼ均等に分散される場合に、利己的に振舞う集団では、共有資源を持続することはできないという点である。

共有地の悲劇に見られる、集団間の社会的ジレンマを2者間に単純化すると、ゲーム理論の繰り返し囚人のジレンマ (IPD: Iterated Prisoners' Dilemma) ゲーム (Axelrod, 1984) と等価になることは良く知られている。囚人のジレンマゲームとは、2人のプレイヤーX、Yがそれぞれ可能な行動として、相手の行動とは独立にCとDの2つを取りうる場合において、それぞれの行動をとったときの利得表が表1となるようなゲームである。ここで、Cは協調 (Cooperation)、Dは裏切り (Defect) を意味しており、先の共有地の悲劇でいうところの、全体の利益を考えて羊を飼うのを抑制する行動 (= C) と利己的な考えから羊をさらに飼おうとする行動 (= D) とに対比できる。

表1 囚人のジレンマゲームの利得表

	C	D
C	R / R	S / T
D	T / S	P / P

注: $T > R > P > S$ かつ $T + S < 2R$

利得のうち、左側が列プレイヤーの利得、右側が行プレイヤーの利得である。

囚人のジレンマゲームを環境問題に当てはめると、例えば次のような物語が考えられる。大気汚染を防ぐために、マイカー通勤をするか電車を使った通勤にするかの選択を迫られているとする。個人の利便性やコストを考えるとマイカー通勤の方がありがたい ($R < T$ かつ $S < P$) が、環境に配慮すると電車を使った方が全体の利益になるので、個人としてもよい ($R > P$)。しかも相手と相談して、奇数日は私がマイカーで相手が電車、偶数日は私が電車で相手がマイカーといった作戦に出たとしても、両者ともに電車通勤であり続けた方がよい ($T + S < 2R$)。このときに、誰もが大気汚染のためには電車通勤が望ましいと分かっているのに (目標認知)、合理的な個人あるいは利己的な個人を仮定するとマイカー通勤という行動認知が生じてしまう。ここで仮定している合理性はあくまでも利己的な個人であり、利得最大化行動を仮定しているという意味では、現実の人間はそんなに非情ではないという議論がある。そのため、合理性の定義を緩和していくモデルもさまざま提案されているが、基本的な人間行動を単純化して表現するモデルとしては適当であるというべきである。むしろ、この程度の合理性を仮定したまま、なおかつ個人が協調行動をとるための諸条件を探ることは、現状の環境問題へのアプローチとして有効な知見を提供しうるであろう。

野波 (2001) は、環境問題におけるこの種の態度変容において、マイノリティインフルエンス (少数者の影響) が重要であるとの一連の研究を発表している。少数者が一貫した行動をとり続けることによって、やがて多数派の基本的な態度であったフリーライドを協調へ導くというものである。これは先の囚人のジレンマゲームでいえば、ある個人が一貫して協調行動をとり続ける

ことによって、彼を搾取して利益を得てきた多数派が、共感や意識変化といった内省的な態度変容を経て、彼の利得構造を変化させてやがて協調行動をとるようになるということである。

しかしながらこれは、かなり苛酷な要求を少数者に課している。変革時に強烈な個性を持ったリーダーシップが要求されるのは、歴史の常であるかもしれないが、ある程度の「合理的な」方法がないのか検討することは重要である。ここで合理的とは、様々な定義を考えることができるが、本稿ではマイノリティであるためのコストがあまりかからないこととする。合理的な条件が存在できれば、環境政策といった、集団を取り巻く環境を整備することによって、マイノリティに苛烈な要求を課さずとも、集団の協調行動が達成され社会としては望ましい状態になる。

少数者であるためのコストについて、ゲーム理論の枠組みで精緻化する。先のマイノリティインフルエンスの研究によれば、少数者は一貫した協調行動をとり続けるということであり、ゲーム理論では All-C 戦略に相当する。しかし、All-C 戦略は裏切りに対して対抗手段がないため、利得構造を変えなければフリーライダーを排除できない。その意味で、All-C 戦略は少数者であるためのコストがかかりすぎる戦略であるといえる。

現実的な合理性を有しながら、「善良な」行動をとることができる個人として「互惠主義的な個人 (Reciprocity)」が挙げられる。経済学において互惠主義とは、ある経済主体が他者に行った善意に対して、その他者もまた相手に好意的行動をなすことを意味している。ゲーム理論では、好意を行動全体に一般化して、相手に対して相手の行動をそのまま返すというしっぺ返し (TFT: Tit-For-Tat) 戦略として表現することができる。

ゲーム理論において互惠主義的な個人、すなわち TFT 戦略が生存可能な条件とは何か。Axelrod (1984) の初期の研究において、この戦略の優位性は明らかにされてきた。しかし重要なことは、必ず裏切るという All-D 戦略が多数派である場合に、TFT は生存することが出来ないということである。これは進化的安定戦略 (ESS: Evolutionarily Stable Strategy) という概念と関係がある。Maynard Smith (1982) によると、ESS とは、もし集団の全員がその戦略を採用していれば突然変異によって侵入してくる他のどんな戦略をとる個体でも、自然選択の力によって排除できるもの、と定義されている。先の事例では、All-D 戦略は進化的安定戦略 (ESS) なのである²⁾。すなわち、フリーライダーが多数派であるとき、マイノリティの互惠主義者は生き延びることが出来ないのである。しかしさらに重要なことは、いくつかの条件を加味すると、これが逆転し、マイノリティである互惠主義者が生き延びる可能性が出てくるという点である。このための条件を探ることは、本稿の目的にとってきわめて重要である。本稿では、これらを解明するために、ゲーム理論を用いた数理的解析を試みる。

2 節では、まずは Cohen et al. (1999) が整理した繰り返し囚人のジレンマゲームの体系を紹介する。特に彼が指摘した状況保持 (Context Preservation) について概説する。状況保持は、互惠主義者が生き延びる条件の緩和に重要な働きを持つためである。3 節では、進化的安定戦略

2) 証明は後述。

(ESS) について確認する。ところで、ESSは多数派となった戦略が侵入者を排除する意味で頑健であることを示す概念であるが、少数派が多数派となっていく過程を表現しているわけではない。その意味で、新たな戦略として「一般的に強い進化的安定戦略 (GSESS: General Strong ESS)」を定義する。ただし「一般的に強い進化的安定」戦略はただちに存在しないことが証明できる。そのことを「ニュートラルミュータント」の概念で説明する。4節では、状況保持 (Context Preservation) の本質を明らかにするために「集合的進化的安定戦略 (CESS: Colonial ESS)」を定義する。また、これを用いて、状況保持の本質を明らかにする。集合的進化的安定戦略が、環境問題に対するフリーライダーを排除するマイノリティの条件に対する意味を論じる。最後に、本稿をまとめ、今後の展望を述べる。

2 繰り返し囚人のジレンマと状況保持

Axelrod (1984) による「繰り返し囚人のジレンマゲーム」に関する一連の研究を端緒として、実に多くの研究がなされている。それらを体系的に整理して、IPDと協調の創発とをまとめた研究にCohen et al. (1999)がある。本節では、この論文 (以下、Cohenと略記) を概観して、そこで重要となっている状況保持 (Context Preservation) という概念を解説する。

2.1 相互作用と実験概要

Cohen が用いていた IPD の利得表は、本稿の表 1 に対して、 $T = 5$, $R = 3$, $P = 1$, $S = 0$ で与えられる。次にモデルを 2 種類の戦略空間、6 種類の相互作用過程、3 種類の適応過程からなる 36 ケースに分類し、それぞれのケースについて、集団サイズ 256、シミュレーション 2500 期、1 期 4 ラウンドの繰り返しゲームを、異なる 30 の乱数種の設定で実験している。

エージェントは戦略として $(i, p, q) \in [0, 1]^3$ をもつ。それぞれ順に、各期の最初のラウンドに協調する確率、2 ラウンド以降に前のラウンドで相手が協調行動をとったときに自身が協調する確率、2 ラウンド以降に前のラウンドで相手が裏切り行動をとったときに自身が協調する確率を意味する³⁾。これは工夫された記法である。なぜなら、 (p, q) が $(0, 0)$ とは All-D 戦略、 $(1, 0)$ とは TFT 戦略、 $(0, 1)$ とは Anti-TFT 戦略⁴⁾、 $(1, 1)$ とは All-C 戦略となり、基本的な戦略をカバーできるからである。

相互作用過程は 6 種類あるが、代表的な 2 つを説明する。相互作用ルール「2DK」とは、エージェントは 2 次元格子トラス上に固定的に配置され、エージェントがプレイする隣人とは、隣接するノイマン近傍の 4 エージェントである。これはシミュレーションを通じて固定され、すなわち、エージェントは常に同じ 4 人とプレイすることを意味する。一方、相互作用ルール「2DS」とは、エージェントは 2 次元格子トラス上に配置され、每期ノイマン近傍の 4 人をプ

3) Cohen では単純化のため $i = p$ としている。

4) Anti-TFT 戦略とは、前のラウンドに相手がとった行動の逆を今期の自身の行動とする戦略である。

レイする点で「2DK」と同じであるが、毎期プレイ終了後に、ランダムにエージェントの位置が再配置される点が異なる。つまり、エージェントは毎回異なるエージェントとプレイすることになるルールである。

相互作用ルール「2DK」と「2DS」では、シミュレーション結果が大きく異なる。前者は、全体が協調に安定（All-C 戦略が多数派）し、その後協調の崩壊（All-D 戦略が多数派）が起きるが、最終的に TFT 戦略が集団の多数派となって、協調的に安定するという結果が得られた。一方後者は、協調が崩壊した後、TFT 戦略が多数派を占めるまで成長できない。この差が状況保持（Context Preservation）に由来すると、Cohen は主張したのである。

2.2 状況保持のメカニズム

Cohen の重要な知見は状況保持（Context Preservation）が協調の促進に重要な概念であることを主張した点である。つまり、相互作用ルール「2DK」は状況保持が可能なので、「2DS」に比べ協調の促進がなされたというメカニズムの発見である。この概念の本質は、All-D 戦略の中にいるわずかな TFT 戦略者は、もし隣り合っていれば All-D より優位になる、という点にある。これを示すために次の状況を考える。

D	D	D	D
D	T	T	D
D	D	D	D

注：D=All-D 戦略, T=TFT 戦略

図1 All-D の海の中にある 2 人の TFT エージェント

図1は、2次元トーラスの格子にエージェントが配置されているうちの一部分を示している。ほとんどのエージェントは All-D 戦略を有しているが、たまたま世界にたった2人しかいない TFT 戦略をもつエージェントが隣り合って出現したという状況を想定している。このときのすべてのエージェントの利得を考えてみよう。

エージェントは3種類に分けられる。ほとんどのエージェントは自身も隣接する4人も All-D 戦略をもっている。この場合の1期に得られる利得 $E(D_1)$ は、4ラウンドすべて (D, D) というプレイが4人ともなされるので、

$$E(D_1) = 4 \times 4 \times P = 16P = 16 \tag{1}$$

である。次に6人の All-D エージェントは隣人の1人に TFT エージェントをもっている。彼らの利得 $E(D_2)$ は、3人のエージェントとの4ラウンドすべての (D, D) プレイと、TFT エージェントとの (D, C) , (D, D) , (D, D) , (D, D) プレイであるので、

$$E(D_2) = 4 \times 3 \times P + (T+P+P+P) = 15P + T = 20 \tag{2}$$

である。最後に、世界に2人の TFT エージェントの利得 $E(T)$ を考える。彼は他の3人の裏切りエージェントからは搾取されるが、たった1人の同志からは協調の利益を味わうことが出来る。すなわち、

$$E(T) = 3 \times (S+P+P+P) + (R+R+R+R) = 9P + 3S + 4R = 21 \tag{3}$$

となる。ここで、 $E(D_2) < E(T)$ となっているところが本質である。この不等号は、All-Dの海にいるTFT戦略エージェントは、それが隣接した2人であった場合は、All-Dエージェントの海の中で、勢力を拡大することが出来ることを意味する。

ちなみに、図2のように、TFT戦略エージェントがたった1人しかいない場合は、All-Dの海の中に埋没してしまう。つまり、 $E(D_2) = 15P + T = 20 > E(T) = 12P + 4S = 12$ である。

D	D	D
D	T	D
D	D	D

図2 All-Dの海の中にいる1人のTFTエージェント

隣接した2人が固定されて存在するためには、相互作用ルールは「2DS」ではなく「2DK」でなければならない。このことをCohenは「状況保持」と名づけた。ランダムに再配置されてしまう環境では、常に同じ2人が隣接することは出来ず、TFTがAll-Dより高い利得を出すことが出来ないからである。つまり、状況保持とは、集団としての安定性を保証する概念なのである。

3 進化的安定戦略とニュートラルミュータント

ゲーム理論の解析的研究に、進化的安定の概念は重要な役割を果たしている。ESSの最初の定義であるMaynard Smith and Price (1973)によると、ESSは次のように定義される。

定義1 (進化的安定戦略 (ESS)) 集団が全員戦略 x を採用しているとせよ、このとき戦略 y を採用している新たな個人が集団に参入したときに得られる利得を $E(y, x)$ とする。戦略 I がESSであるとは、任意の I ではない戦略 J に対して、 $E(I, I) > E(J, I)$ であるか $E(I, I) = E(J, I) \& E(I, J) > E(J, J)$ であるときをいう。

Maynard Smith (1982) は、IPDにおいて、ゲームが十分繰り返されれば、TFTがESSであることを証明している⁵⁾。しかし、これは理論的厳密性から検討すると瑕疵がある。TFTはAll-Cミュータントの侵入を阻止できないのである⁶⁾。しかし、Axelrod (1984) などの一連の研究によって、一連のゲームが十分長く行われるときには、TFTが他のいかなる戦略の侵入に対しても安定であることが示されている。しかもAxelrod (1984) のシミュレーションはTFTに進化的に淘汰される初期条件の範囲はずっと広い。このことからTFTが強い戦略として広く知られることになった。

しかし、TFTがESSであるのと同様、All-DもESSであることが証明できる⁷⁾。理論的には、

5) TFT戦略が記憶を1期しか持っていないので、ミュータントエージェントとしては、All-C、All-DとAlt-DC (D, C, D, C, D, ...) の3種類を考えればよい。このうち、All-DとAlt-DCを阻止するための条件は、将来割引率 ω が $\max\left\{\frac{T-R}{T-P}, \frac{T-R}{R-S}\right\}$ 以上であれば良いことが知られている (Axelrod and Hamilton, 1981)。

6) なぜなら、 $E(TFT, TFT) = E(All-C, TFT) \& E(TFT, All-C) = E(All-C, All-C)$ だから。

TFT は ESS ではないので、IPD における ESS とは、All-D であるという言明の方が正しい。ところで本稿で興味があるのは、フリーライダーといった All-D のような戦略が安定的であるときに、如何にしたら集団を TFT に淘汰することが出来るかといった問題である。これは ESS より強い概念を必要としている。

そのため、キラー戦略ともいべき強い性質をもった戦略を考える。この戦略は、どのような戦略が多数派であったも、勢力を伸ばすことができ、しかも一度多数派となったらいかなるミュータントも排除するという意味で ESS である戦略である。これを「一般的に強い進化的安定戦略 (GSESS: General Strong ESS)」と定義する。数理的には次の通り。

定義 2 (一般的に強い進化的安定戦略 (GSESS)) 戦略 I が GSESS であるとは、 I が ESS であり、なおかつ次の性質を満たしているときをいう。任意の I ではない戦略 J に対して、 $E(I, J) > E(J, J)$ であるか $E(I, J) = E(J, J) \ \& \ E(I, I) > E(J, I)$ であるときをいう。

ただし、十分に長い IPD ゲームでは、GSESS は存在しないことが直ちに証明できる⁸⁾。これは、All-D が ESS なので、All-D が少数者である状況で、All-D が打ち破れない多数派の戦略が存在することを示せばよい。そしてそれは TFT が該当する。将来割引率 ω に対して、 $E(\text{TFT}, \text{TFT}) = \frac{R}{1-\omega}$ であるのに対し、 $E(\text{All-D}, \text{TFT}) = T + \frac{\omega P}{1-\omega}$ であるから、 $\omega > \frac{T-R}{T-P}$ であれば、All-D は GSESS ではない。そして、他のいかなる戦略も多数派が All-D のとき、多数派にはなれない。

そこで、GSESS を緩和する必要がある。そのため、まず、ニュートラルミュータント (Bender and Swistak, 1998) を定義する。

定義 3 (ニュートラルミュータント) 戦略 I が多数派を占めている集団にあって、ある I ではない戦略 J が I と同じ行動を常にとるとき、 J を I のニュートラルミュータントと呼ぶ。

ニュートラルミュータントは多数派と区別がつかないため、多数派が変わらない限り、排除されないミュータントである。このことから直ちに、次の定理が導出できる⁹⁾。

7) All-D 戦略はゲームの記憶を必要としていないので、All-C と All-D 以外のいかなる戦略も、それが最善の戦略であるということはあるいえない。なぜなら、相手がいかなる複雑な戦略を有していても、All-D 戦略はあまりにも単純なので、その戦略に意味はなく、純粹に行動が C であったか D であったかにしか影響が生じないからである。よって、All-C ミュータントに対する状況のみを考えればよいことが分かる。明らかに $E(\text{All-D}, \text{All-D}) > E(\text{All-C}, \text{All-D})$ であるので、All-D 戦略は ESS である。

8) 一般的なゲームでも GSESS が存在しないだろう。

9) 証明は簡単。ESS である I にニュートラルミュータント J が存在すると、 $E(I, I) = E(J, I)$ 、 $\& \ E(I, J) = E(J, J)$ であるので、 I は ESS ではない。

定理 1 (ESS のニュートラルミュータントの非存在証明) 戦略 I が ESS であるとする、 I のニュートラルミュータントは存在しない。

十分に長い IPD においては、All-C が TFT のニュートラルミュータントである¹⁰⁾から、TFT は ESS ではない。

次に、「弱安定戦略 (WSS: Weakly Stable Strategy) を定義する」¹¹⁾。

定義 4 (弱安定戦略 (WSS)) 戦略 I が WSS であるとは、任意の I ではない戦略 J に対して、 $E(I, I) > E(J, I)$ であるか $E(I, I) = E(J, I) \& E(I, J) \geq E(J, J)$ であるときをいう。

WSS は ESS と見なせる戦略のうち、ニュートラルミュータントの存在を許す戦略を含む。当然ながら、ESS ならば WSS である。

定理 2 (WSS と ESS の関係) ESS ならば WSS である。

さきほど、十分に長い IPD において TFT にニュートラルミュータントがあることを示し ESS ではないことを証明したが、上記の定義によって TFT は WSS であることが証明される。実はこのことは、次の戦略ダイナミクスの存在を示していることになる。ここで All-C 戦略を C 、All-D 戦略を D 、TFT 戦略を T と略記する。

1. T が多数派を占めている。
2. C は T のニュートラルミュータントなので、 T はミュータント C を排除できない。
3. C は勢力を伸ばし、やがて多数派を占める可能性を持つ¹²⁾。
4. C が多数派であるとき、 $E(D, C) > E(C, C)$ なので、ミュータントである D は生き延び、勢力を拡大する。
5. D が多数派を占める。

TFT 戦略が多数派を占めている状況では、 $E(T, T) > E(D, T)$ であるから、All-D 戦略は排除される。しかし、TFT のニュートラルミュータントである All-C 戦略では排除できない。このことは、TFT が実は安定戦略ではないことを如実に示している。環境問題で見られるフリーライダー (All-D) を互惠主義者 (TFT) は排除できる。しかし善良無関心者 (All-C) は排除できないのである。しかし、互惠主義者はフリーライダーを排除するため「裏切り (D)」とい

10) TFT が多数派であるとき、TFT は常に協調行動をとることになり、これは All-C と変わらない行動である。

11) Bender and Swistak (1998)。

12) T より C の生成や維持に関するコストが小さければ C は確実に勢力を伸ばすことが出来る。

う懲罰行動に出る必要があり、それは自分の利得を下げることになる。一方、善良無関心者は他の互恵主義者がフリーライダーを懲罰してくれたら、懲罰に発生するコストを引き受けることがないので、最も高い利得を獲得することが出来る。しかし、善良無関心者は、彼自身の力でフリーライダーを排除できない。このため、「裏切り者を見たら懲罰しなければならない」という社会的ルールが創発することになる。これが「規範ゲーム」の知見である¹³⁾。

本節の最後に「一様安定戦略 (USS: Uniformly Stable Strategy)」を定義する¹⁴⁾。この直観的な意味は、どのような他の複数の戦略の中でも打ち負かされない (同等であればよいという意味で勝たなくても良い) という意味で安定的な戦略のことである。

定義 5 (一様安定戦略 (USS)) I と I すべてのニュートラルミュータントの集合 $N(I)$ を考える。

戦略 I が USS であるとは $\forall i \in N(I)$ が混在して多数派を形成しているあらゆる状況 $s(I)$ において、任意の i ではない戦略 J に対して、 $E(i, s(I)) > E(J, s(I))$ であり $E(I, J) \geq E(i, J)$ であるときをいう。

なお定義上 $E(i, s(I)) > E(J, s(I))$ は $E(i, s(I)) \geq E(J, s(I))$ である必要はない。 $E(i, s(I)) = E(J, s(I))$, $E(i, J) \geq E(J, J)$ である状況とは、 J が I のニュートラルミュータントであることを意味しているので、「 i ではない戦略 J 」という定義から存在しないからである。そして、Bendar and Swistak (2001) は、一様安定戦略に対する重要な定理を導出している¹⁵⁾。

定理 3 (USS の非存在証明) 戦略が *dyadic* (当事者間の過去の行動のみに基づいて決定される戦略) であるような USS は存在しない。すなわち、USS ならばそれは社会的戦略 (当事者以外の行動を考慮に入れる戦略¹⁶⁾) である。

dyadic で一様安定戦略が存在しない、このことは規範 (正確にはメタ規範) の創発にとって重要な知見となる。しかし、これは All-D が多数派を占める状況を除外している。次節では、TFT 戦略の可能性について別の側面から検討する。

13) ちなみに、善良無関心者は、裏切りに対して慣用であるという意味で、2次のフリーライダーといわれる (竹澤他, 2002)。

14) Bendar and Swistak (2001) における USS と等価の概念であると思われるが、異なる表現で定義する。証明は今後の課題である。

15) 例えば、All-D 戦略にとって下品な (Bendor and Swistak, 1998) TFT 戦略 (最初は裏切り、後は TFT 戦略) はニュートラルミュータントであり、TF2T 戦略 (相手が2回連続して裏切ったことが裏切り条件となる戦略) を相手に低い利得となる。

16) Axelrod (1986) におけるメタ規範。

4 状況保持と集合的進化的安定戦略

前節では、TFT が進化的安定戦略ではなく、弱安定戦略であることを示し、それゆえニュートラルミュータントの侵入により一様安定にはならないことを言及した。これを防ぐ条件として、メタ規範といった社会的戦略の創発可能性について論じた。しかし十分に長い IPD ゲームでは、社会的戦略であっても TFT 戦略が多数派を占めている状況から議論が開始されている。しかし、環境問題のフリーライダーとは All-D が多数派を占めている状況であり、一様安定戦略はこの場合、無意味である。そこで、他の条件を探ることによって ESS という強力な戦略である All-D が多数派を占めている状況であっても、TFT が勢力を伸ばすことができる可能性を探る必要がある。ヒントは2節で解説した状況保持である。All-D の海の中で、TFT 戦略のコロニー (Colony) は生き延びることができるのである。この議論をはじめするために、コロニー (Colony) を定義する。

定義 6 (コロニー (Colony)) ゲーム理論において、常に同じプレイヤーとプレイする条件が満たされているときに、戦略 I をもつプレイヤー X の相手の中に、 I をもつプレイヤーがいるとき、 I はコロニーを形成しているといい、コロニーを形成している I 戦略者の数を $C(I)$ で表記する。

2節の状況保持の例では $C(TFT) = 2$ であるコロニーが形成されると All-D が多数派であっても、勢力を伸ばすことができる。このことを数学的に定式化した「集合的進化的安定戦略 (CESS: Colonial ESS)」を定義する。

定義 7 (集合的進化的安定戦略 (CESS)) 戦略 I が CESS であるとは、任意の I ではない ESS である J に対して、 I がコロニーを形成することで、 $E(I, J) > E(J, J)$ であるか $E(I, J) = E(J, J) \& E(I, I) > E(J, I)$ となるときをいう。

十分に長い IPD ゲームにおいて、TFT 戦略は CESS である。ESS である All-D の中で $C(TFT) = 2$ を形成すると、2節の考察から常に每期4エージェントとプレイするとして、 $3S + 4R - 6P - T \geq 0$ のとき、All-D を打ち負かすことができるからである。

CESS は定義としてはまだ不十分である。CESS であるためには WSS でなければならないとか、あるいは別の条件を緩和する必要があるかどうかは今後の大きな検討課題であろう。しかし、この定式化によって「状況保持」を CESS の枠組みで記述する可能性が認められる。またこの知見は、環境問題に対するフリーライダーを排除するマイノリティの条件に対する意味を明らかにしているともいえる。すなわち、Cohen の状況保持の本質は、All-D 戦略の海の中で隣り合うコロニーを形成した TFT 戦略者が CESS であるところにあるのである。

5 終わりに

本稿でわれわれは、フリーライダーが多数派であるとき、マイノリティの互惠主義者が生き延びる条件を議論する過程で集合的進化的安定の概念を抽出することに成功した。この知見は、環境問題において、善良なマイノリティであるために払うコストがあまりかからないことを意味する。その意味で、互惠主義というある種の合理性を有した個人がコロニーを形成することで、無秩序なフリーライダーの攻撃に耐える可能性を見いだすことができた。本稿は、理論的厳密性の追求にまだ議論の余地があるが、数理的解析によって、興味深い知見を導き出している。

本稿の拡張はいくつかの方向性が考えられる。そもそも囚人のジレンマゲームは2者間の社会的ジレンマに単純化されたモデルである。これをもとの共有地の悲劇のような集団間の社会的ジレンマ構造に置き換えたときに、本稿の議論がそのまま適用できるかは、重要な検討課題である。また、(繰り返し)囚人のジレンマゲームはゲーム理論の一ゲームに過ぎない。さまざまなゲームへの拡張も必要になってくる。こういった議論を詰めていくことで、マイノリティ問題への強力な知見の提供につながっていくことだろう。

参考文献

- [Axelrod and Hamilton, 1981] Axelrod, R. and W.D. Hamilton, The Evolution of Cooperation, *Science*, 211: 1390-1396.
- [Axelrod, 1984] Axelrod, R., *The Evolution of Cooperation*, New York, Basic Books.
- [Axelrod, 1986] Axelrod, R., An Evolutionary Approach to Norms, *American Political Science Review*, 80: 1095-1111.
- [Bender and Swistak, 1998] Bender, Jonathan and Piotr Swistak, Evolutionary Equilibria: Characterization Theorems and Their Implications, *Theory and Decision*, 45: 99-159.
- [Bender and Swistak, 2001] Bender, Jonathan and Piotr Swistak, The Evolution of Norms, *American Journal of Sociology*, 106(6): 1493-1545.
- [Cohen, et al., 1999] Cohen, M. D., R. L. Riolo, and R. Axelrod, The Emergence of Social Organization in the Prisoner's Dilemma: How Context - Preservation and other Factors Promote Cooperation, SFI Working Paper Series, on <http://www.santafe.edu/sfi/publications/wpabstract/199901002>, Santa Fe Institute.
- [Hardin, 1968] Hardin, Garrett, The Tragedy of the Commons, *Science*, 162: 1243-1248.
- [Maynard Smith, and Price, 1973] Maynard Smith, John, and G.R. Price, The Logic of Animal Conflict, *Nature*, 246: 15-18.
- [Maynard Smith, 1982] Maynard Smith, John, *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge University Press. (邦訳) 寺本英他, 『進化とゲーム理論—闘争の論理—』, 産業図書, 1985.
- [野波, 2001] 野波寛, 『環境問題における少数者の影響過程—シミュレーション・ゲーミングによる実験的検証—』, 晃洋書房.
- [Olson, 1965] Olson, M., *The Logic of Collective Action*, Cambridge, Harvard University Press.
- [竹澤他, 2002] 竹澤正哲, 亀田達也, 「所有と分配—共同分配規範の社会的発生基盤に関する進化ゲーム分析」, 日本認知科学会編, 『進化ゲームとその展開』, 共立出版.

[Yamagishi, 1986] Yamagishi, T., The Provision of a Sanctioning System as a Public Good, *Journal of Personality and Social Psychology*, 50: 110-116.